

Laserantriebe

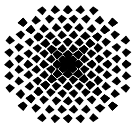
*Eine Uhr, die auf Schiffen pro Tag
auf zirka drei Sekunden genau geht,
ist undenkbar.*

Isaac Newton, 1714

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

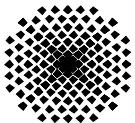
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017

*Du hast nichts anderes im Kopf,
als Käfer sammeln, Jagen und
Ratten fangen
und wirst dir und der ganzen Familie
nichts als Schande machen.*

*Robert Waring Darwin, 1821,
Vater von Charles*



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

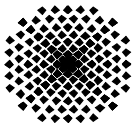
Bakterien sind Hirngespinnste.

Rudolf Virchow, 1870

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

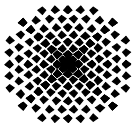
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017

*Von der Fotografie in natürlichen
Farben ist leider nicht nur für die
nächste Folgezeit,
sondern aus theoretischen Gründen
auch für alle Zukunft
so gut wie nichts zu erwarten.*

Emil du Bois-Reymond, 1890



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

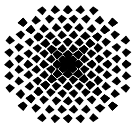
*Diese Strahlen des Herrn Röntgen
werden sich als Betrug herausstellen.*

William Thomson (Lord Kelvin), 1897

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

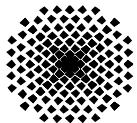
*Alles, was erfunden werden kann,
wurde bereits erfunden.*

Charles Duell, US Patentamt, 1899

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

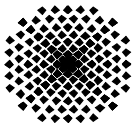
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017

*Die weltweite Nachfrage nach
Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht
überschreiten –
allein schon aus Mangel an verfügbaren
Chauffeuren.*

Gottlieb Daimler, 1901



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

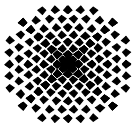
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017

*Das Pferd wird es immer geben.
Das Automobil ist nur eine
vorübergehende Erscheinung.*

Wilhelm II., 1906



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

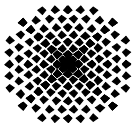
*Flugzeuge sind interessant,
haben aber keinerlei militärischen Wert.*

Marschall Ferdinand Foch, 1911

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

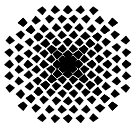
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017

*Es gibt nicht das geringste Anzeichen,
dass wir jemals Atomenergie entwickeln
können.*

Albert Einstein, 1932



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

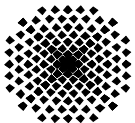
*Ich denke, dass es einen Weltmarkt für
vielleicht fünf Computer gibt.*

Thomas J. Watson, IBM, 1943

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

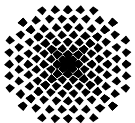
IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017

*Für einen Reporter, der unterwegs
Notizen aufschreiben will, mag das
interessant sein.*

*Aber für den Durchschnittsnutzer sind
diese Geräte [tragbare Computer]
unnütz, und es gibt auch kaum Software
dafür.*

Steve Jobs, 1985



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

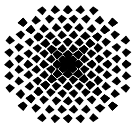
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017

Das Werk [in Tschernobyl] verfügt über sichere und zuverlässige Kontrollen, so dass die Reaktoren gegen jede Störung mit drei Sicherheitssystemen, die unabhängig voneinander arbeiten, geschützt sind.

Vitali Sklyarow, Energieminister der Ukraine, 1986



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

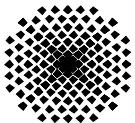
Die Zeitung ist im Jahr 2000 tot.

Bill Gates, 1998

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

01.02.2017



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

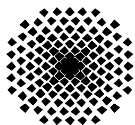
01.02.2017



Dr. Stefan Scharring

Institut für Technische Physik, Stuttgart

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Aufgabe 1: Unkonventionelle Antriebe

Bauen Sie einen Papierflieger.

Er soll quer durch den ganzen Raum bis zur Tafel fliegen.

Sie haben 1 Minute Zeit.

Aufgabe 1: Unkonventionelle Antriebe

Bauen Sie einen Papierflieger.

Er soll quer durch den ganzen Raum bis zur Tafel fliegen.

Sie haben noch 45 Sekunden Zeit.

Aufgabe 1: Unkonventionelle Antriebe

Bauen Sie einen Papierflieger.

Er soll quer durch den ganzen Raum bis zur Tafel fliegen.

Sie haben noch 30 Sekunden Zeit.

Aufgabe 1: Unkonventionelle Antriebe

Bauen Sie einen Papierflieger.

Er soll quer durch den ganzen Raum bis zur Tafel fliegen.

Sie haben noch 15 Sekunden Zeit.

Aufgabe 1: Unkonventionelle Antriebe

Bauen Sie einen Papierflieger.

Er soll quer durch den ganzen Raum bis zur Tafel fliegen.

Sie haben noch 10 Sekunden Zeit.

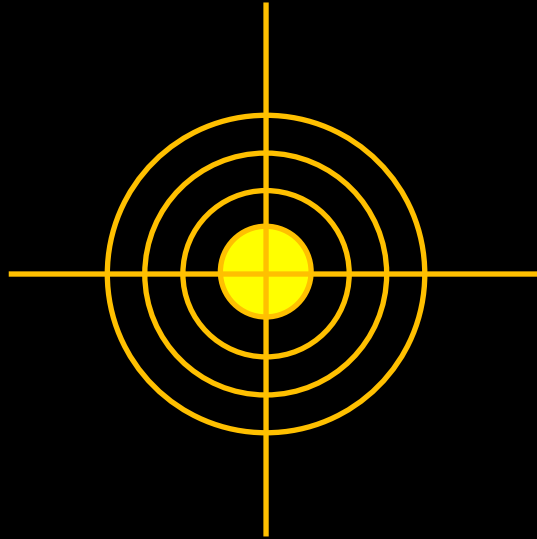
Aufgabe 1: Unkonventionelle Antriebe

Bauen Sie einen Papierflieger.

Er soll quer durch den ganzen Raum bis zur Tafel fliegen.

Sie haben noch 5 Sekunden Zeit.

Aufgabe 1: Unkonventionelle Antriebe

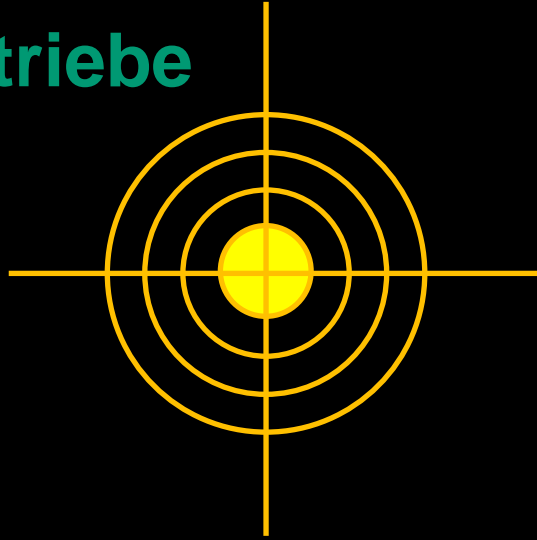


Der Papierflieger soll quer durch den ganzen Raum bis zur Tafel fliegen.

Zusatzaufgabe:

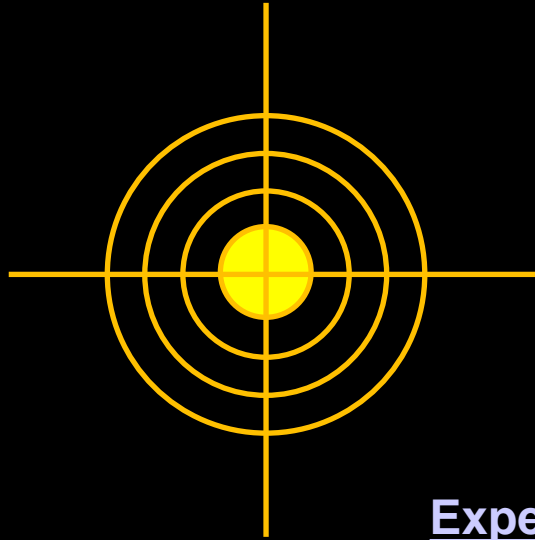
Verbessern Sie Herstellungszeit und Zielsicherheit.

Aufgabe 2: Laserantriebe



Experiment 1:

- Schubkraft: 6.7 pN
- Leistung Laserpointer: < 1 mW



Optimierungspotenzial:

- Steigerung der Laserausgangsleistung
- Fokussierung der Laserstrahlung
- Verwendung kurzer Laserpulse
- Anpassung von Material und Wellenlänge

Experiment 2 (CLEANSPLACE):

- Mittlere Laserleistung: 33 W
- 3 ns Pulse: 94 MW (Puls)
- 3 mm Fokus: 190 MW/mm²
- Aluminium, $\lambda = 1064$ nm
- Energiedichte: 4.7 J/cm²
- Schubkraft: 700 μ N
- $c_m = 21$ μ N/W

Motivation

Upload von
Antriebsenergie
MW

Minimaler
Treibstoffverbrauch
<1 %

Satelliten präzise
positionieren
nm - μ m

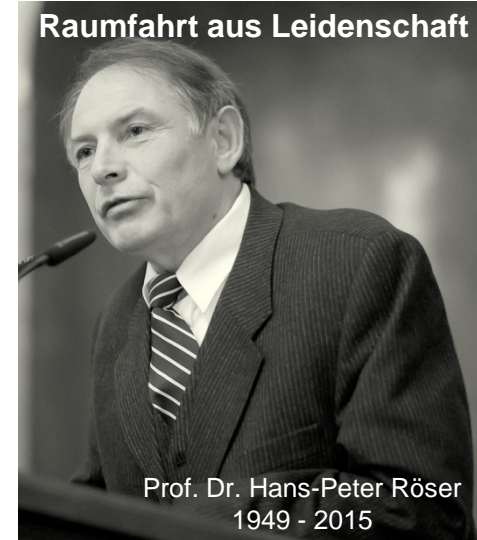
Weltraumschrott
aufspüren und
verglühen lassen
cm - dm



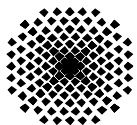
*Wenn Du ein Schiff bauen willst,
dann trommle nicht Männer zusammen,
um Holz zu beschaffen, Aufgaben zu vergeben
und die Arbeit einzuteilen,
sondern lehre die Männer die Sehnsucht nach
dem weiten, endlosen Meer.*

Antoine de Saint-Exupery.

Raumfahrt aus Leidenschaft



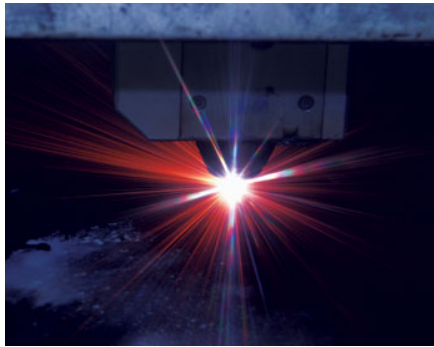
Prof. Dr. Hans-Peter Röser
1949 - 2015



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

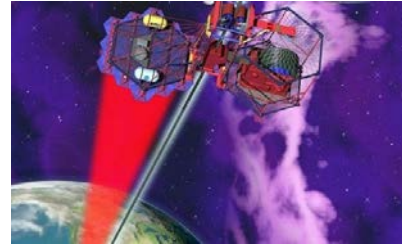




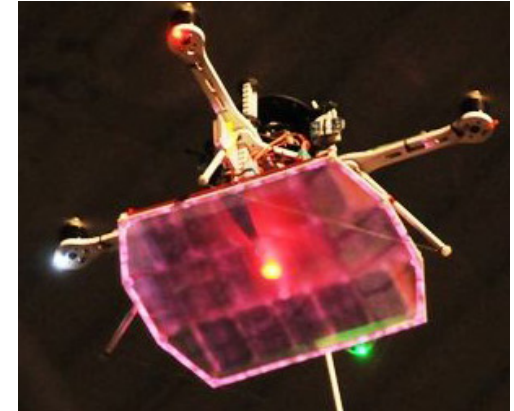
Laserschneiden
von Stahl



Laserschwert



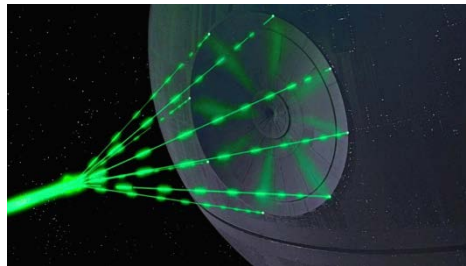
Weltraumfahrstuhl



Quadrocopter



Augen-OP (Lasik)



Todesstern

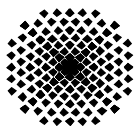


Photonenantrieb



Lasersegel

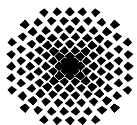
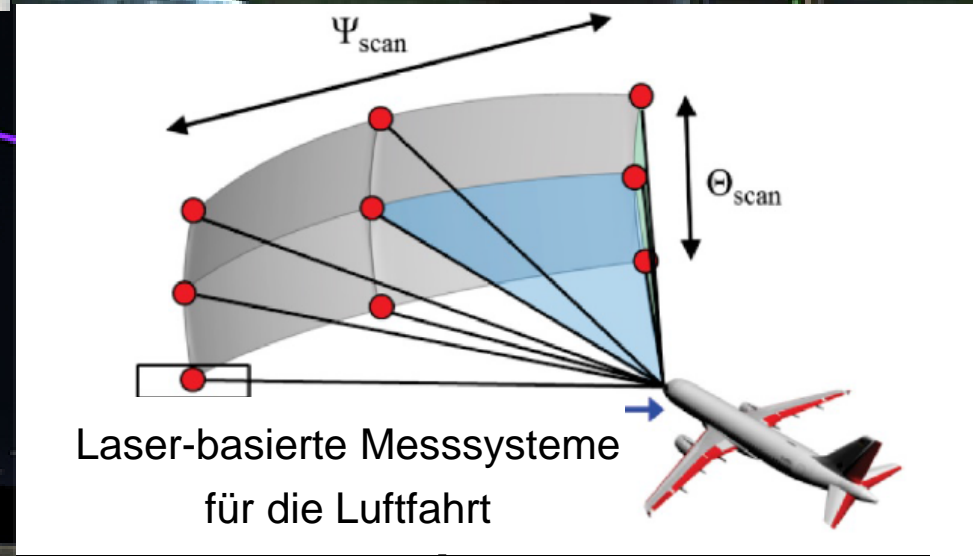
Myrabo et al, Laser-boosted light sail experiments with the 150-kW- LHMEI II CO₂ laser, Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de





Geschichte



E. Sänger



Kantrowitz

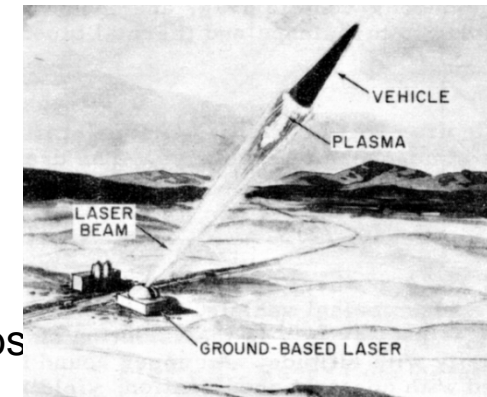
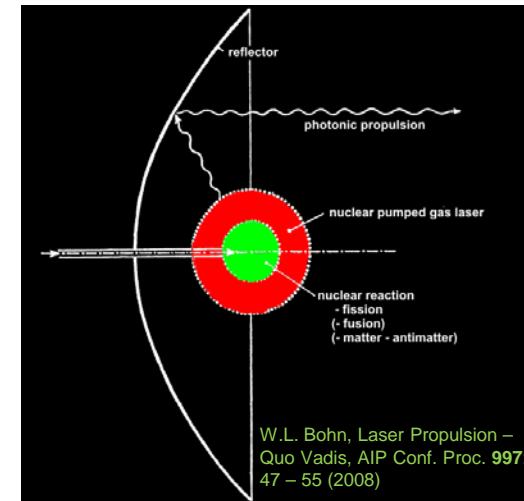


Myrabo

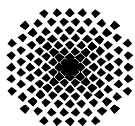


Phipps

1953	E. Sänger	Konzept Photonenrakete
1967	G.A. Askarian	Laser-ablativer Impulsübertrag
1972	A.Kantrowitz	Konzept bodengestützter Laserantrieb
1991	Schall	Laser-basierte Beseitigung von Weltraummüll
1995	Liukonen	Flug im Labor (CO ₂ -Laser)
1997	Myrabo	Freiflug
1998	DLR	Vertikalflug im Labor
2000	Myrabo	Weltrekordflug, 71 m
2002	Phipps	Konzept des laser-ablativen Mikroantriebs
2006	Bae	Photonischer Laserantrieb



Pirri et al, Laser propulsion,
AIAA paper 72-719 (1972)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Definitionen und Beispiele

Definition Laserantrieb:

Antrieb, bei dem die Laserenergie einen substantiellen und unverzichtbaren Beitrag zur Bewegungsenergie liefert

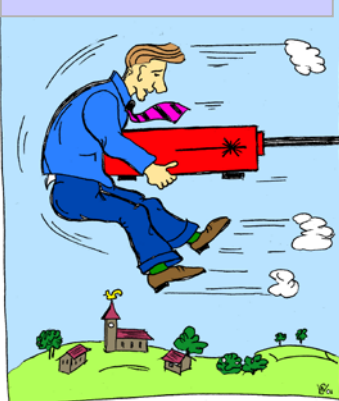
Allgemeine Definition Lightcraft:

Antrieb, der auf gerichteter elektromagnetischer Strahlung beruht (Laser oder Mikrowelle)

Lightcraft im engeren Sinne:

Antrieb durch laser-gestützte Detonationen mit räumlich getrennter Laserquelle

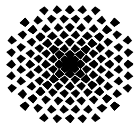
Photonenantrieb



Laserthermischer Antrieb



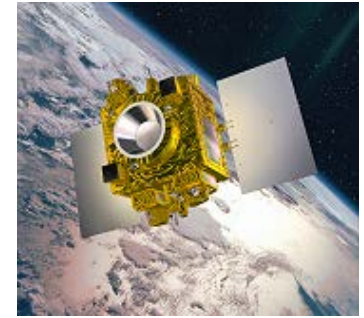
Laser Lightcraft



Beamed Energy Propulsion – onboard laser



GRACE: © NASA/JPL-Caltech



MICROSCOPE: © CNES

Alternative Lageregelung im sub- μN bis mN-Bereich für

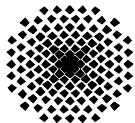
- wissenschaftliche Missionen
- Formationsflüge zur Erdbeobachtung

Vollständige Vermeidung beweglicher Komponenten für

- langjährige Betriebsdauer
- *trägheitsfreien Betrieb*

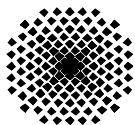
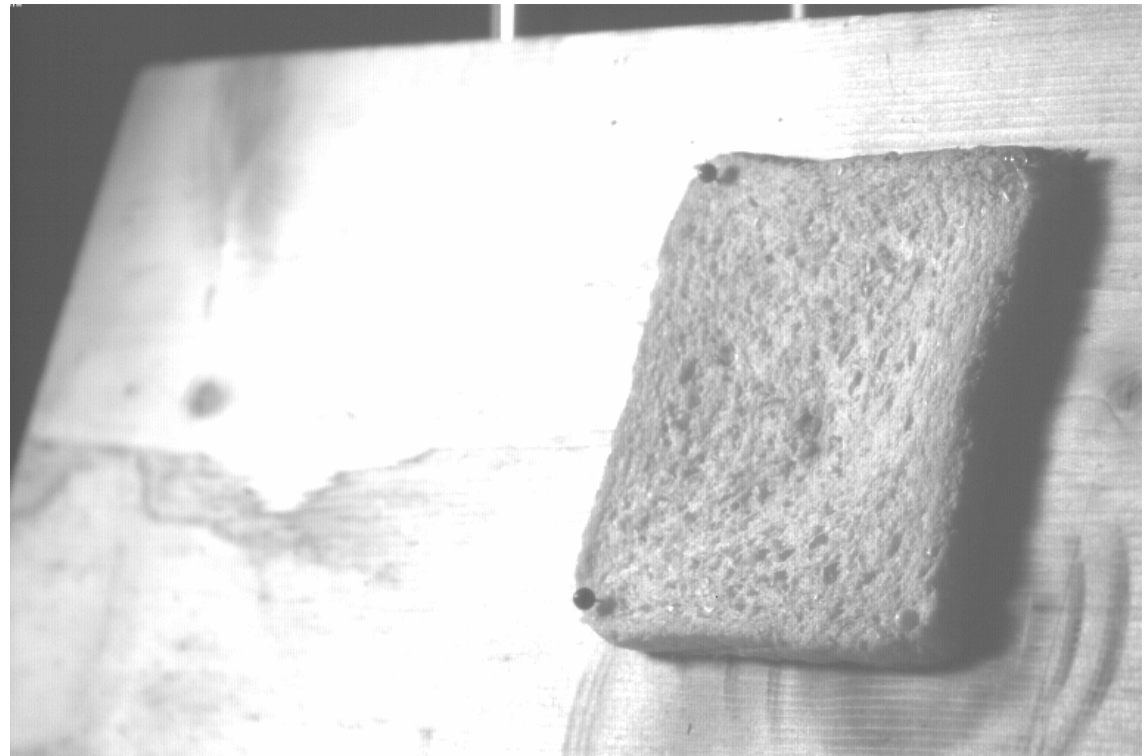
Minimale Restbeschleunigung $< 10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$

Dittus et al, *Applications of Microthrusters for Satellite Missions and Formation Flights Scenarios*,
Beamed Energy Propulsion, AIP Conf. Proc. **1402**, 367-373 (2011)



Beispiel: Rückstoß durch Materialabtrag („unkooperatives Target“)

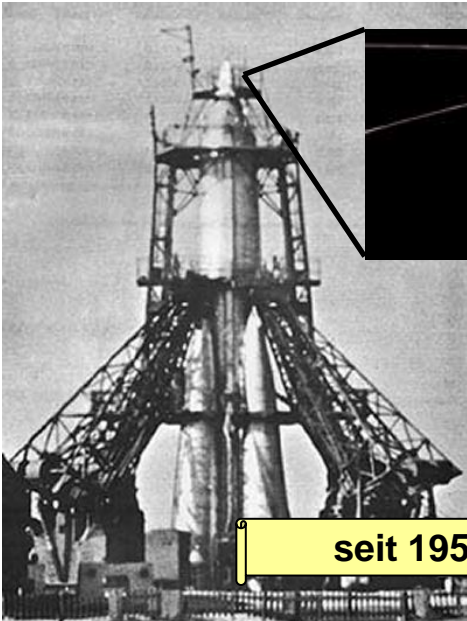
- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls: $\sim 10 \mu\text{s}$, 150 J
- Leistungsdichte, **unfokussiert**:
 $\sim 290 \text{ kW} / \text{cm}^2$
(solar: $140 \text{ mW} / \text{cm}^2$)
- Repetitionsrate: 50 Hz
- Laserstrahldurchmesser:
8 cm



Beamed Energy Propulsion – Ground-based Laser

Transport des Energieträgers

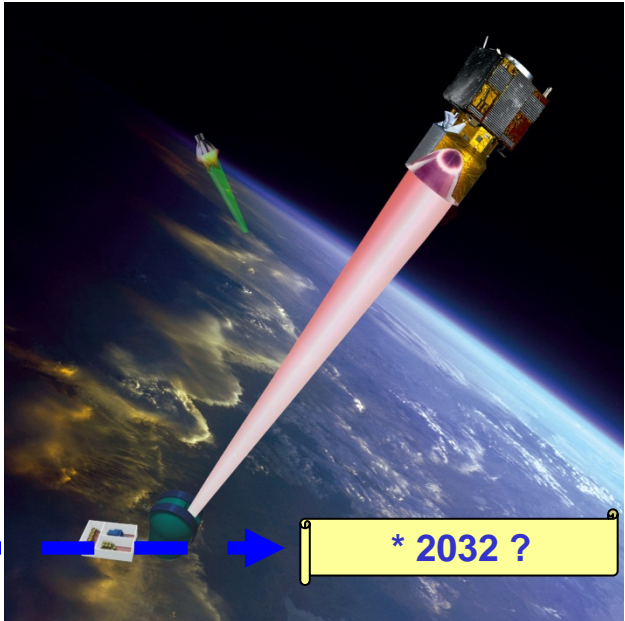
Externe Energiequelle



Nutzlast: Sputnik-I,
83,6 kg, 58 cm
Interkontinentalrakete:
280 t, 34 m

seit 1957

75 Jahre F&E?



* 2032 ?

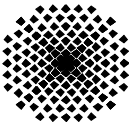


seit 1804

75 Jahre F&E

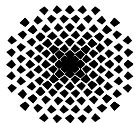
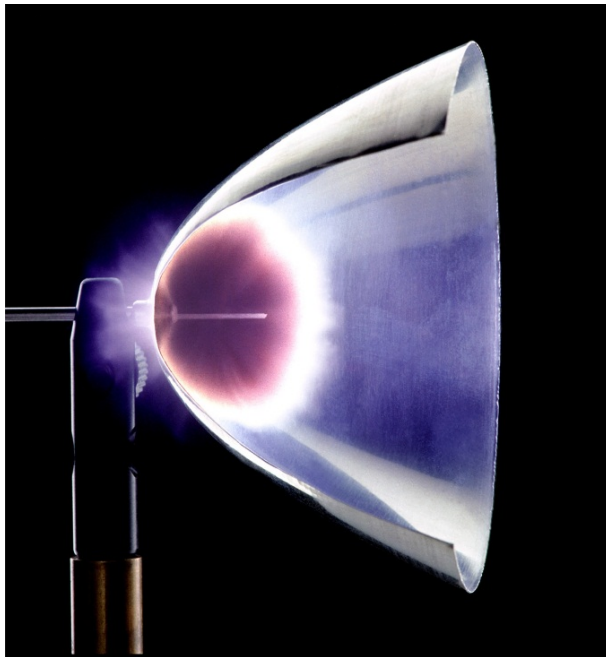


* 1879



Beispiel 2: Schuberzeugung in Düse („*kooperatives Target*“)

- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls: $\sim 10 \mu\text{s}$, 150 J
- Leistungsdichte, **fokussiert**:
 $3,3 \text{ MW} / \text{cm}^2$
- Repetitionsrate: 50 Hz



Inhalt

1 Einleitung

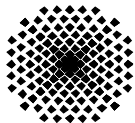
2 Laser

- > **2.1 Funktionsprinzip**
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

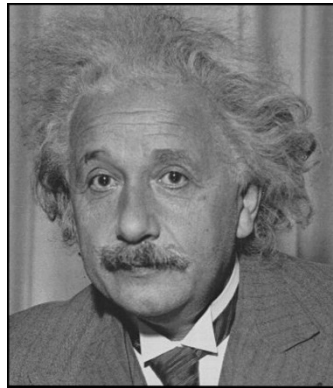
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

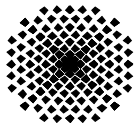
4 Zusammenfassung

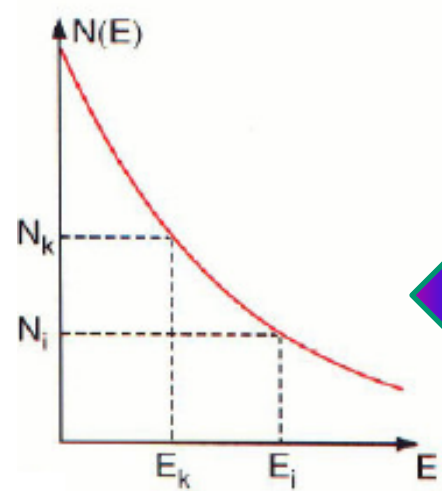


Geschichte

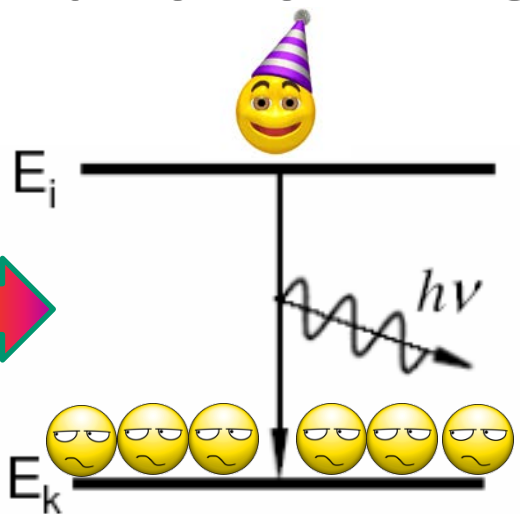


- 1916 Postulat der Stimulierten Emission (Albert Einstein)
- 1951 Erfindung des MASERs
(Charles Townes, Nikolai Basov, Alexander Prokorov)
- 1960 Erfindung des Rubin-Lasers
- 60`s Halbleiterlaser, Nd:YAG-Laser, Argon-, CO₂, chemische Laser,
Farbstofflaser, Metaldampfaser
- 70`s Excimer-Laser, Free-Electron-Laser, COIL





Thermisches Gleichgewicht,
z.B. für Molekülschwingungen,
Elektronenzustände



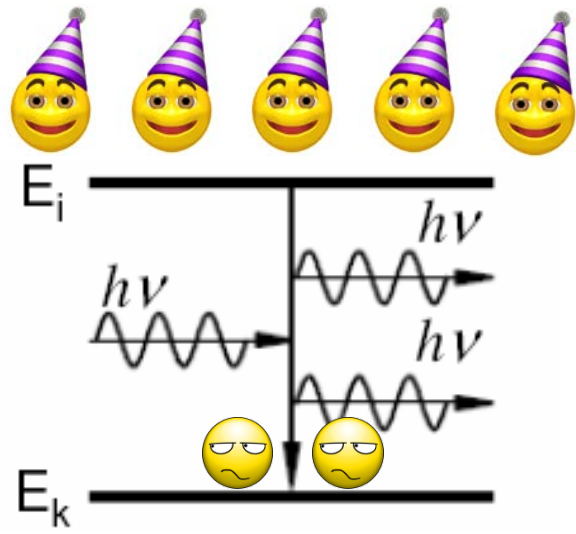
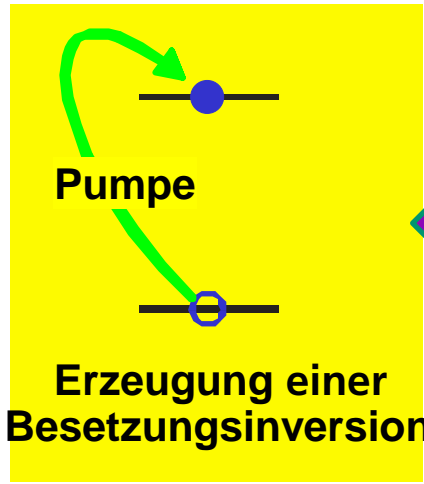
Spontane Emission

Diskrete (quantisierte)
Energieniveaus



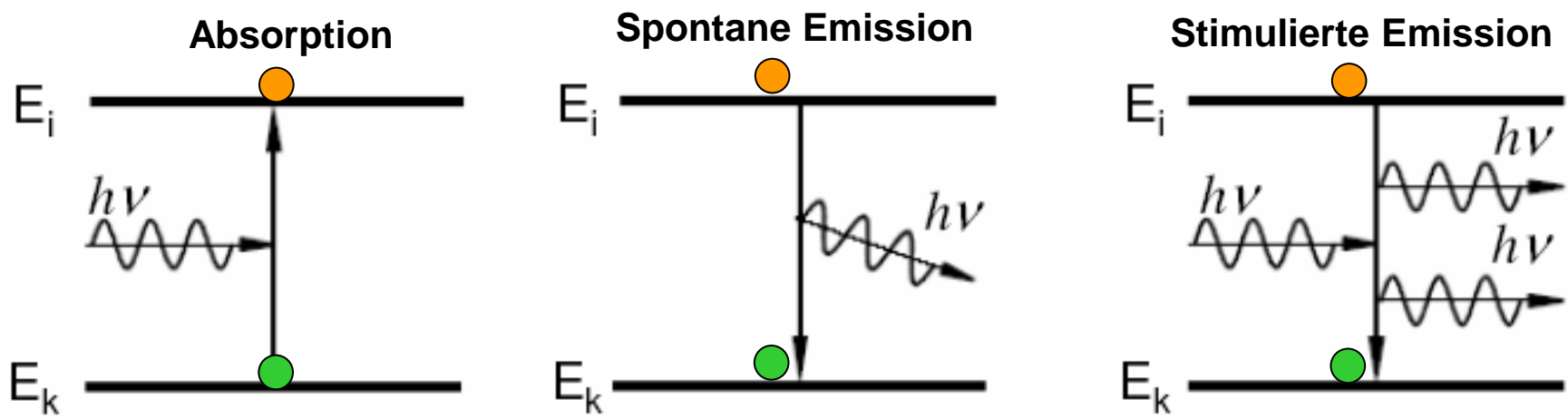
$$E_{rot} = 1/2 \cdot M \cdot \omega^2 R^2$$

Kontinuierliche
Energieübergänge



Stimulierte Emission

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

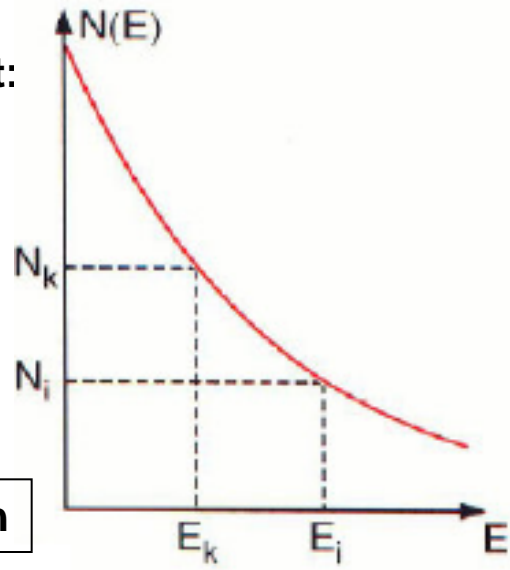


Besetzung der Energieniveaus im thermischen Gleichgewicht:

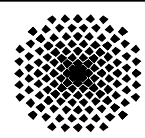
$$\frac{N_i}{N_k} = \frac{g_i}{g_k} e^{-(E_i - E_k)/kT} = \frac{g_i}{g_k} e^{-h\nu/kT}$$

(Boltzmann-Verteilung)

N: Besetzungszahl
g: Entartung der Energieniveaus



Lichtverstärkung ➡ **Besetzungsinversion erforderlich**



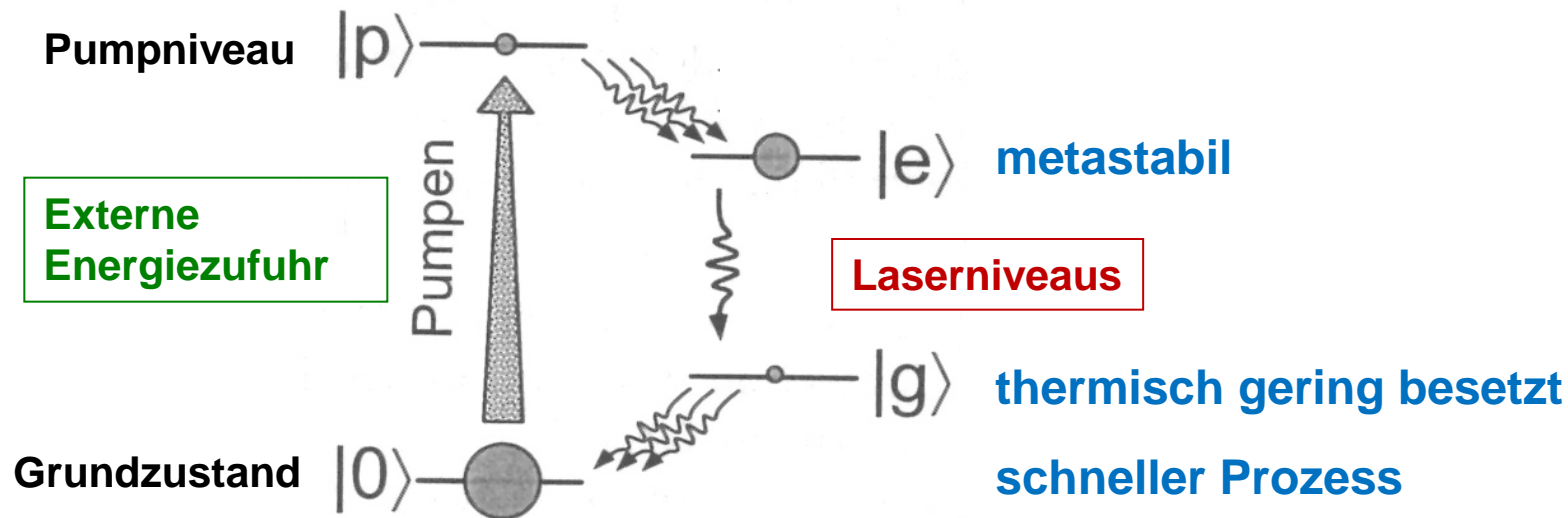
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Pumpprozess

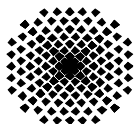
Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation



Pumpprozesse:

- **Elektronenstoß**
- **Stöße zwischen Molekülen**
- **chemische Reaktionen**
- ...

D. Meschede, Optik, Licht und Laser, Teubner-Verlag 1999, Leipzig



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserresonator

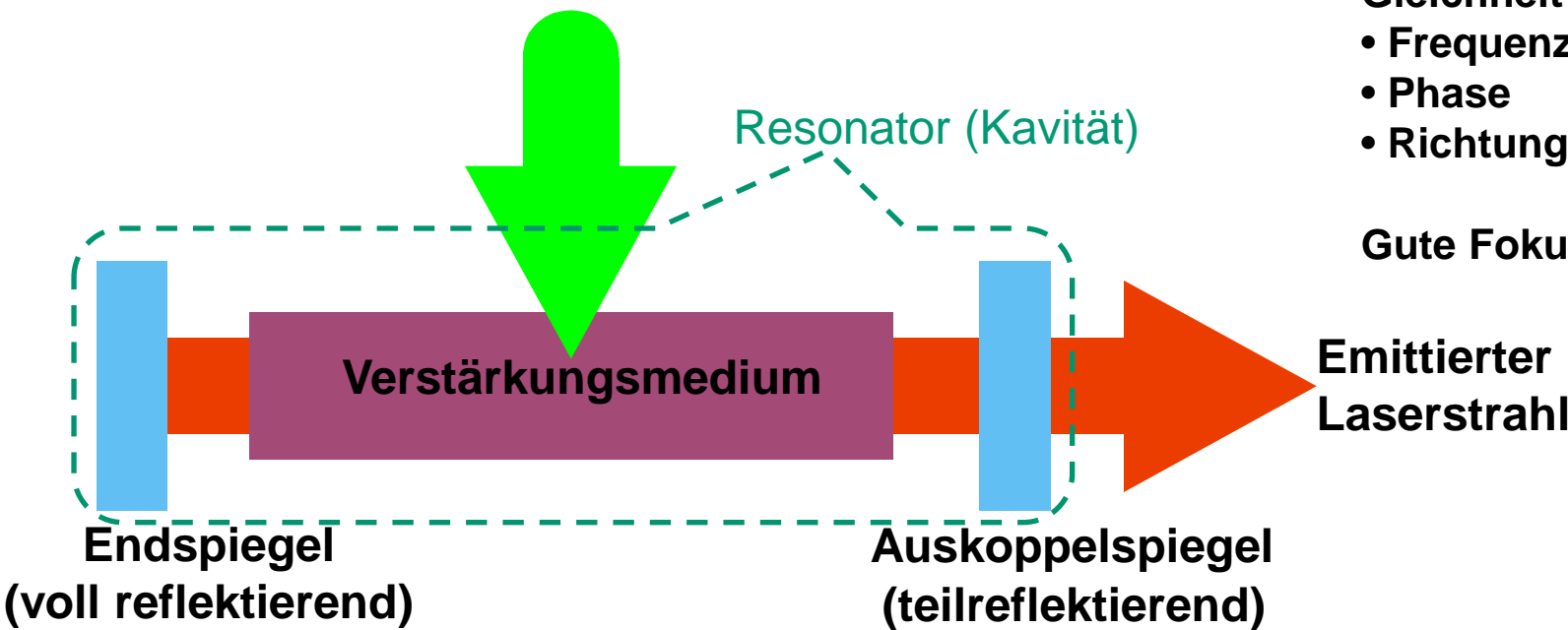
Pumpenergie

Kohärentes Licht:

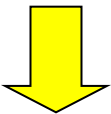
Gleichheit von

- Frequenz
- Phase
- Richtung

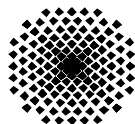
Gute Fokussierbarkeit



Kleinsignalverstärkung (materialspezifisch) >> Absorption



Lichtverstärkung („Photonenlawine“)



Inhalt

1 Einleitung

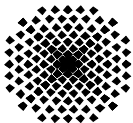
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > **2.2 Beispiele**
 - > 2.2.1 Halbleiterlaser
 - > 2.2.2 Festkörperlaser
 - > 2.2.3 Gaslaser
 - > 2.2.4 Andere Laserquellen
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

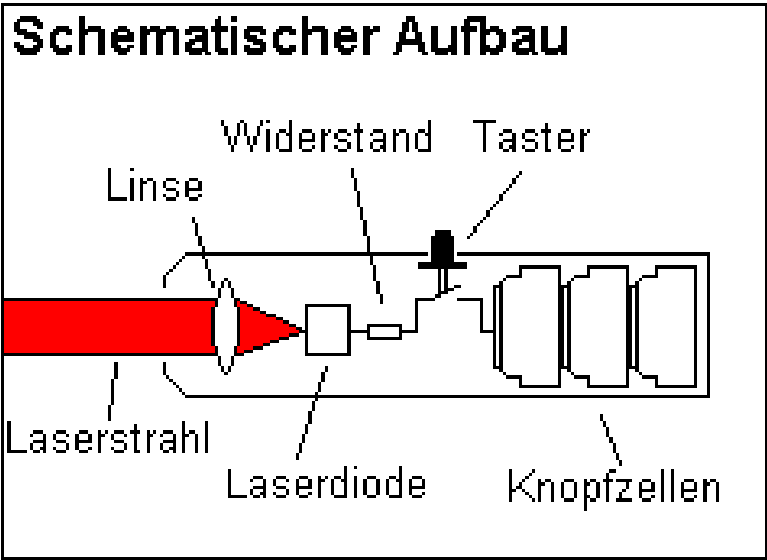
- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung

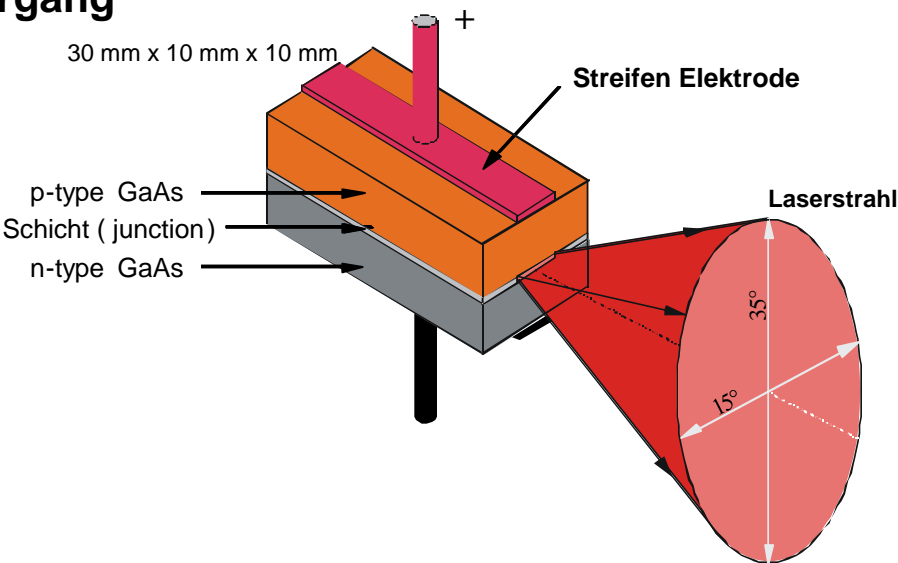


Halbleiterlaser

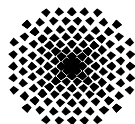
- **Lichtemission:** Rekombination am pn-Übergang
- **Pumpprozess:** Gleichstrom
- **Resonator:** Teilreflektierende Endflächen



Beispiel: Laserpointer
 $P_{opt} < 1 \text{ mW}$: augensicher
bei Lidschlussreflex



- + hoher Wirkungsgrad (bis 50%, IR)
- + Einzelemitter: 100 μW ... 10 W
- + kompakte Baugröße
- limitierte Strahlqualität



Festkörperlaser

Laseraktive Ionen + Wirtsmaterial (Glas, Kristall, Polymer...)

Beispiel: Nd:YAG (Reines 4-Niveau-System)

Emission des oberen Laserniveaus ${}^4F_{3/2}$ (230 μ s):

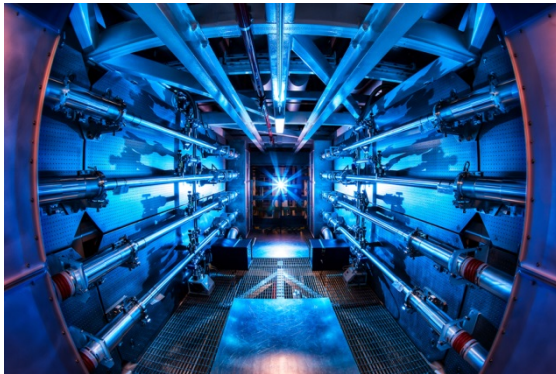
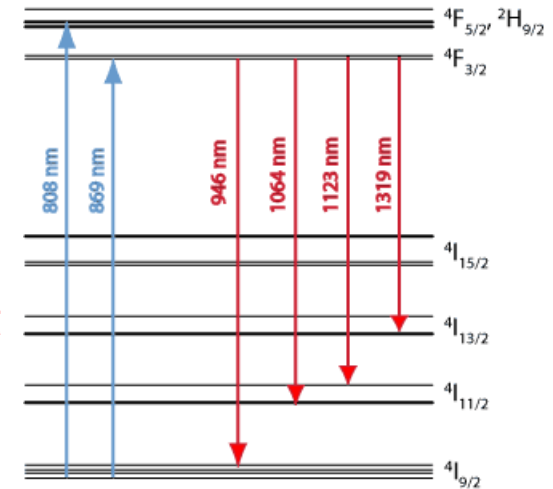
• 1320 nm (~14%) / **1064 nm (~55%)** / 946 nm (~30%)

Pumpprozess: optisch (nahes Infrarot)

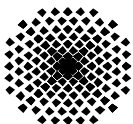
- Gasentladungslampen
- Laserdioden

Thermisches Management?

- Erwärmung
- Ausdehnung
- Brechungsindexgradient



National Ignition Facility
Fusionsexperimente
> 3 MJ Laserpulsenergie



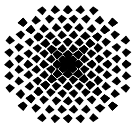
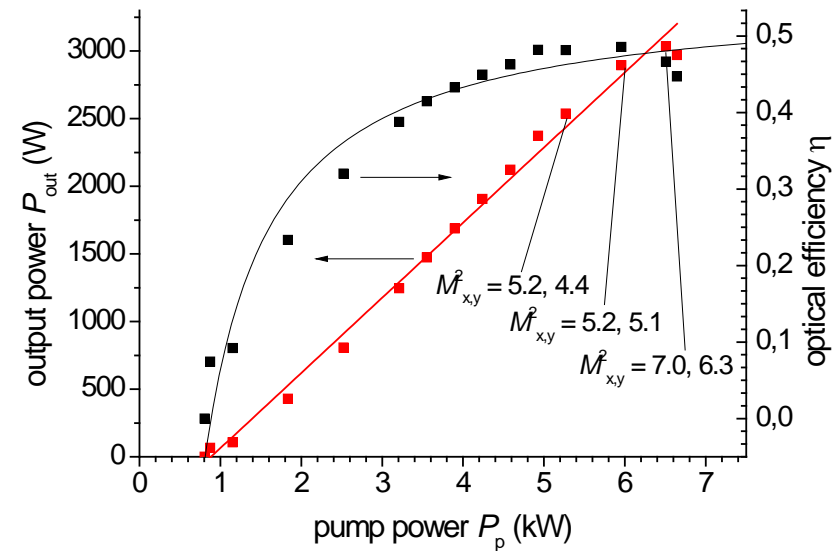
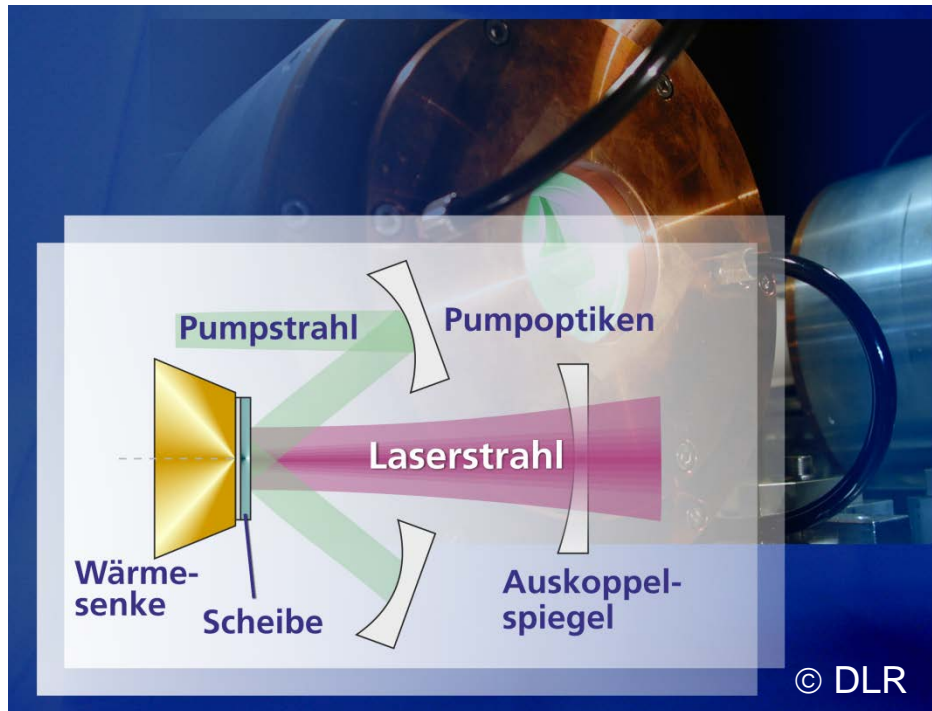
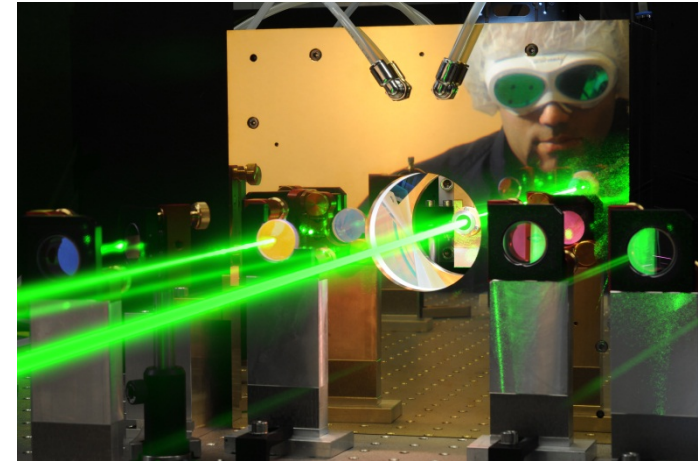
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

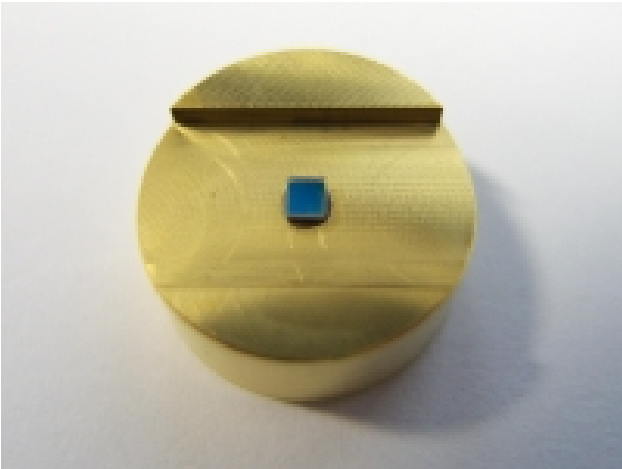
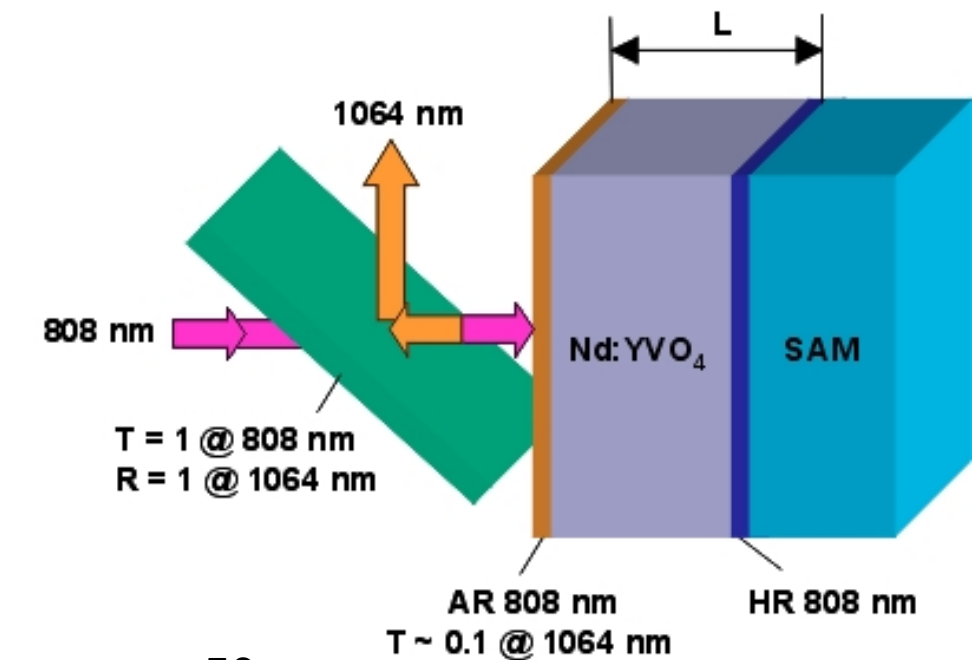


Scheibenlaser

- Gemeinsame Erfindung DLR-TP / IFSW Uni Stuttgart
- 100 – 200 μm Kristallscheibe, z.B. Yb:YAG
- Pumpmodule: Laserdioden
- cw-Betrieb im kW-Bereich, gut skalierbar
- gepulster Betrieb fs – ns möglich
- hohe Brillanz (Leistung x Strahlqualität)



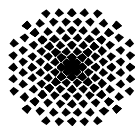
Mikrochipi Laser



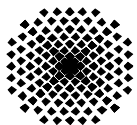
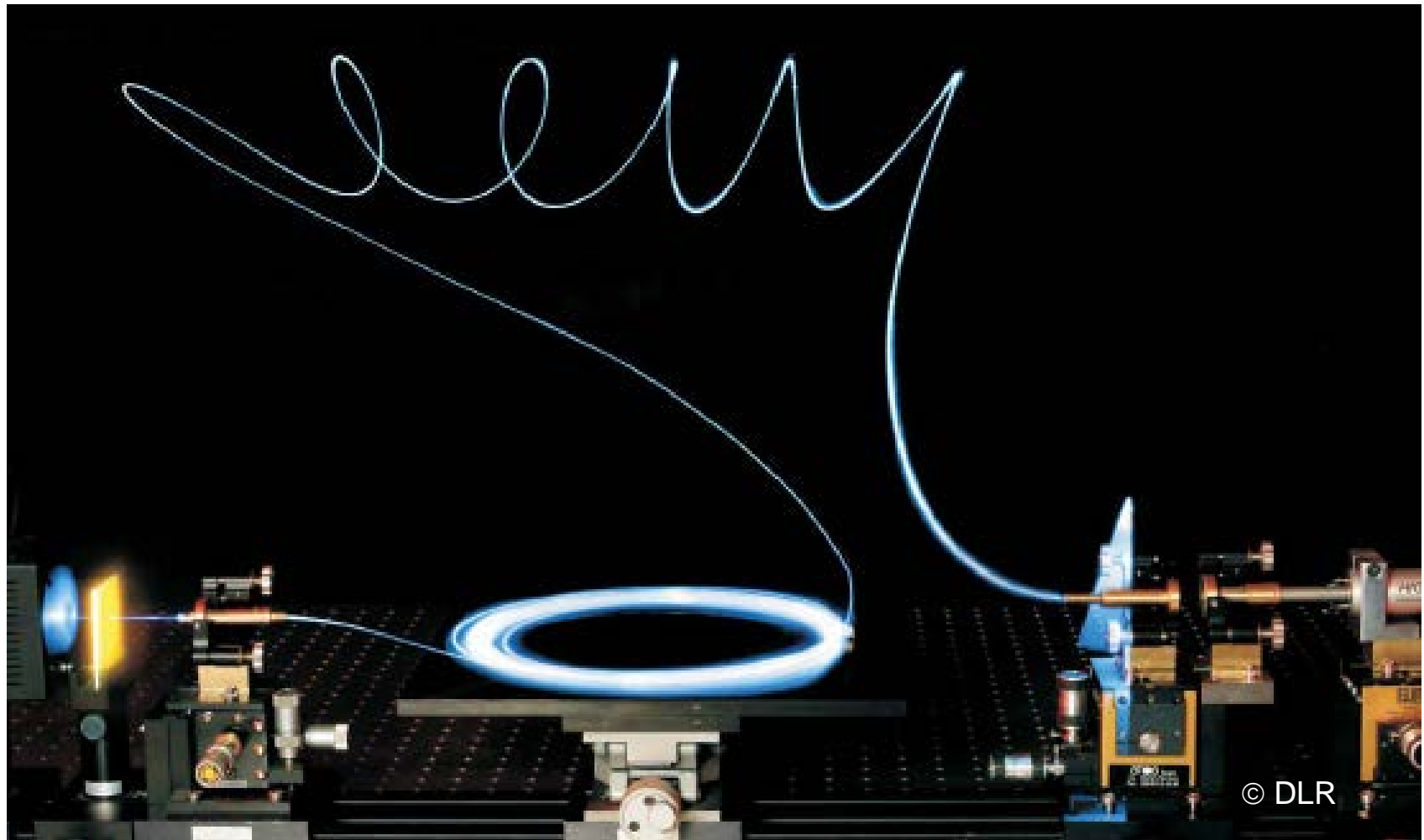
Pumpfleck Ø 40 – 80 µm

τ 50 ps
 f_{rep} 100 kHz – 3 MHz
 E_L 4 nJ

© BATOP optoelectronics, Data sheet microchip MC-1064-50ps



Faserlaser



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



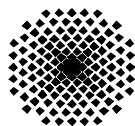
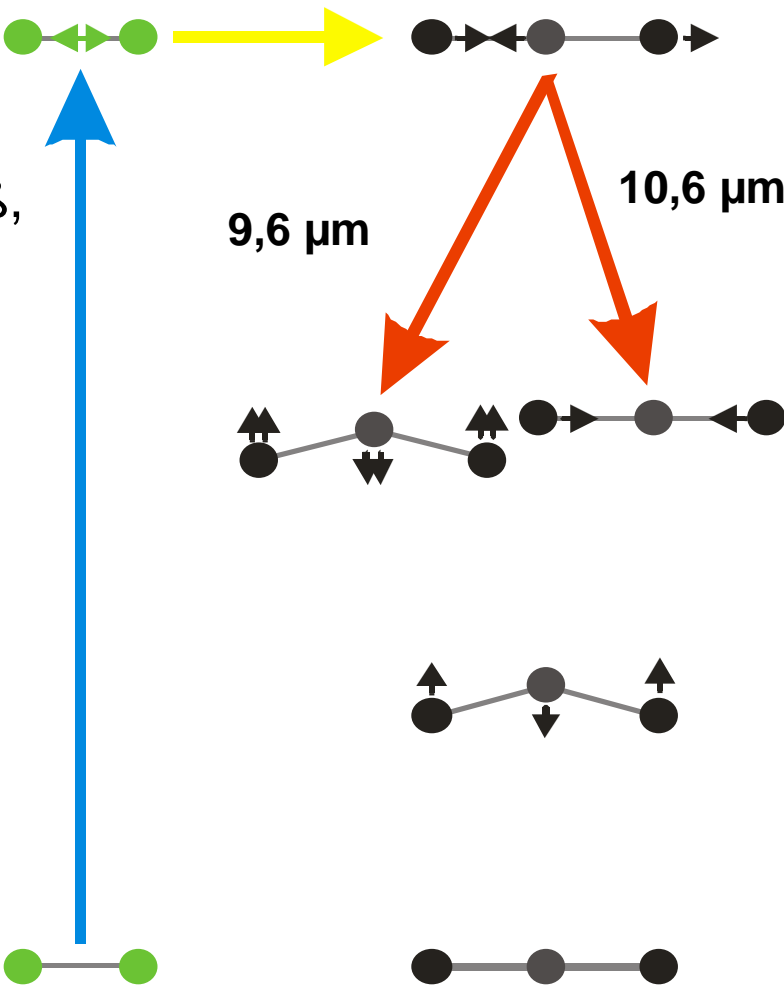
Elektrisch angeregter CO₂-Laser

Anregungsschema

Vibrationsanregung durch Elektronenstoß,
DC-Entladung; RF-Entladung

Energietransfer N₂ ⇒ CO₂
Laseremission 10,6 µm und 9,6 µm
Strahlungslose Relaxation in den
Grundzustand ⇒ Wärme

Vorteil von Gasen:
homogenes Brechungsindexprofil
Kühlung, z.B durch Gaskreislauf
oder Beimischung von He, möglich



Multispektrallaser

Elektronenstrahlgestützte Entladung

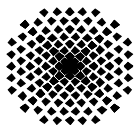
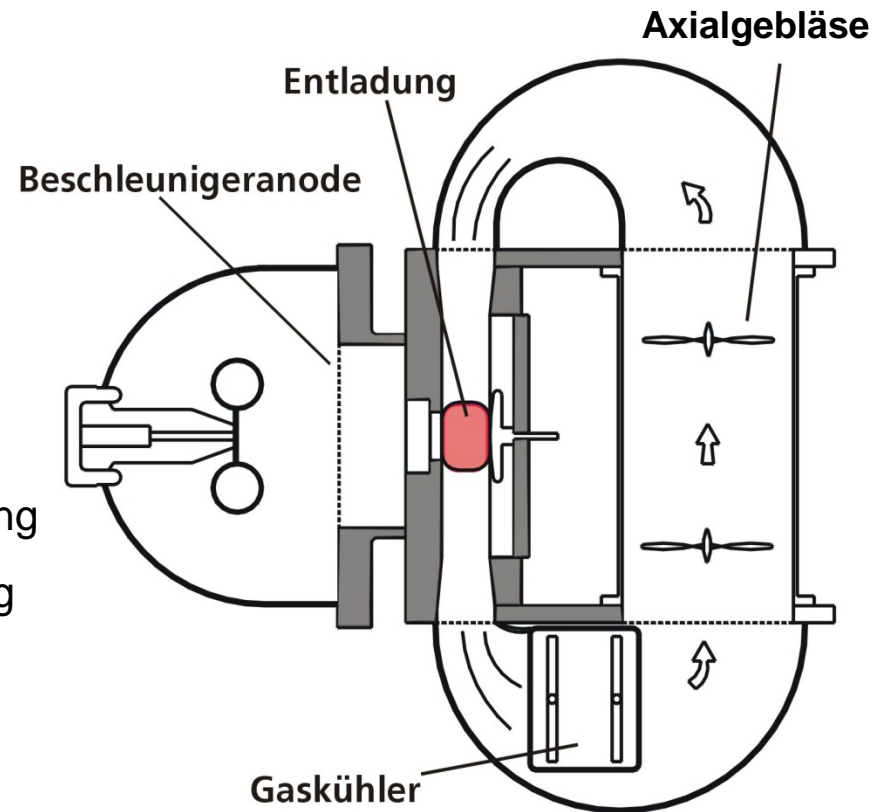
Elektronenstrahl 120 kV
➤ Vorionisation und Triggerung
Hauptentladung 20 – 50 kV
➤ Pulsenergie 25 – 450 J

Verfügbare Spektralbereiche

9,6 – 10,8 μm	CO ₂
4,9 – 6,8 μm	CO Grundschiwingung
2,5 – 3,4 μm	CO Oberschiwingung
1,7 μm	Ar-Xe

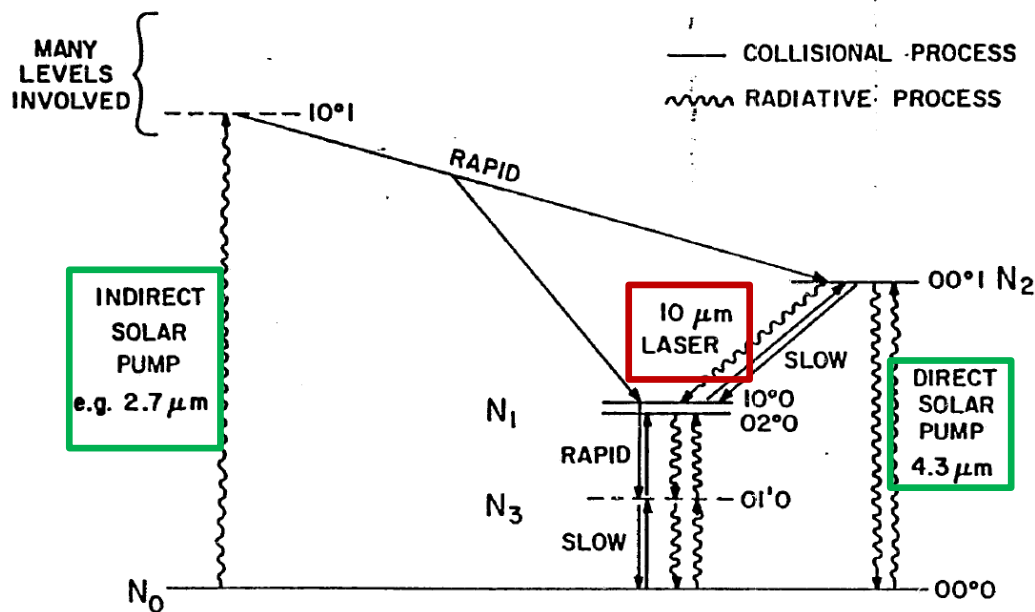
Kenndaten (CO₂)

Mittlere Leistung 10 kW
Pulszahl bis zu 1000
Pulsenergie 100 J @ 100 Hz
Pulslänge 2 – 12 μs



Natürlicher CO₂-Laser

MOLECULAR PHYSICS OF NATURAL MARTIAN LASER



D. Deming et al., Modeling of the 10 Micrometer Natural Laser Emission from the Mesospheres of Mars and Venus, NASA Technical Memorandum # 85045, 1983

Emittierte Laserleistung

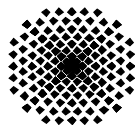
($\lambda = 9,4 \mu\text{m}$ und $\lambda = 10,4 \mu\text{m}$ kombiniert):

- Mars: $P = 1,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
- Venus: $P = 5,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

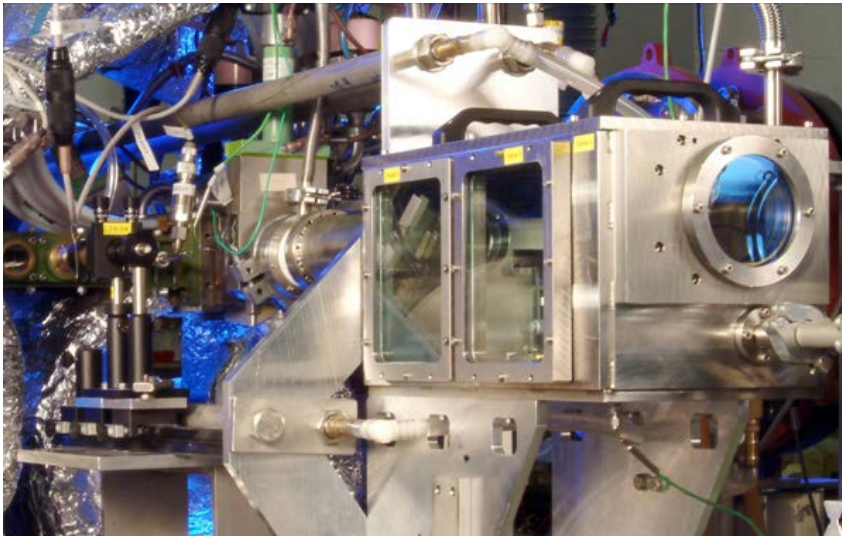
D. Deming et al., Observations of the 10 Micrometer Natural Laser Emission from the Mesospheres of Mars and Venus, NASA Technical Memorandum # 85044, 1983

Maximal zulässige Bestrahlung (mittleres IR):

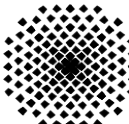
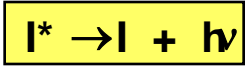
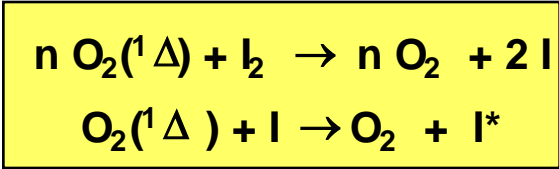
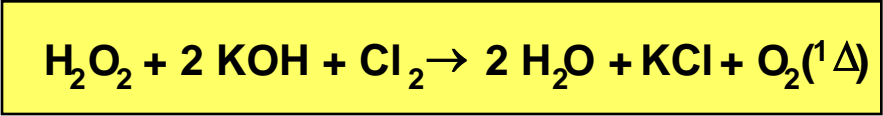
- Auge: $P_{MZB} = 0,1 \text{ W}/\text{cm}^2$
- Haut: $P_{MZB} = 0,1 \text{ W}/\text{cm}^2$



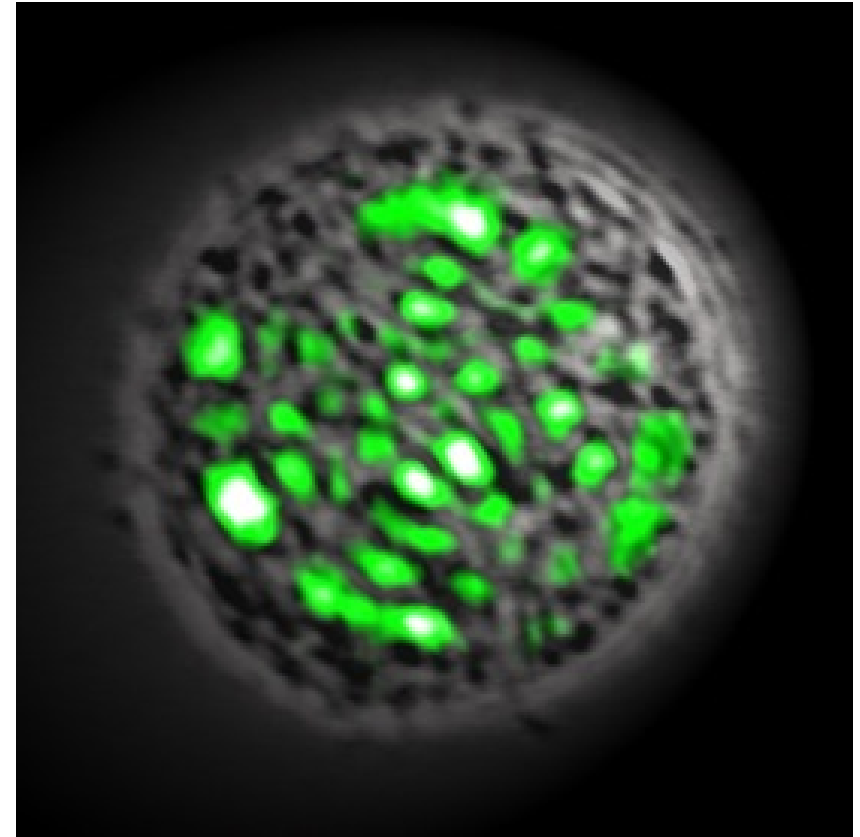
Chemischer Sauerstoff-Iod-Laser (COIL)



COIL der 10 kW-Klasse (cw)
DLR-ITP Lampoldshausen



„Biolaser“



Einzelne Zelle einer Qualle
im Resonatoraufbau

Pumpprozess:

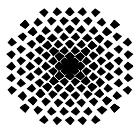
ns/nJ Pulse (blau)

Lasermedium GFP

(green fluorescent protein), $\lambda = 516 \text{ nm}$

Zelle lebt auch nach längerer Laseremission.

M.C. Gather et al, Single-cell biological lasers, Nature Photonics **5**, 406-410 (2011)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Inhalt

1 Einleitung

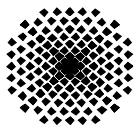
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > **2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung**
 - > 2.3.1 Fokussierbarkeit und Reichweite
 - > 2.3.2 Propagation

3 Antriebskonzepte

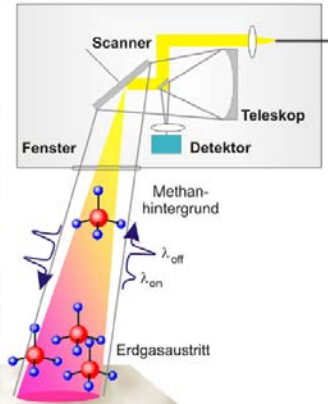
- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung



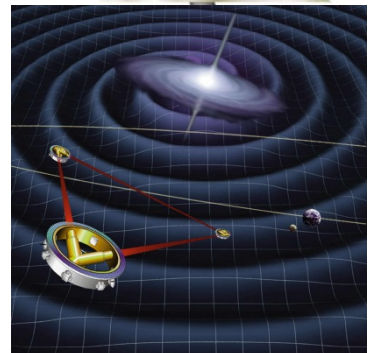
Eigenschaften

➤ Kohärentes Licht mit Gleichheit von
➤ Frequenz ➡ Spektroskopie



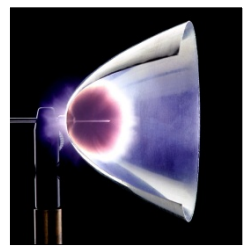
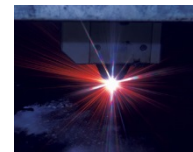
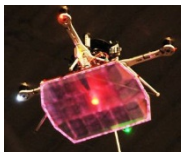
Bsp.: Detektion von
Lecks in Gasleitungen

➤ Phase ➡ Interferometrie

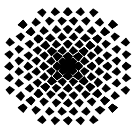


Bsp.: Detektion von
Gravitationswellen

➤ Richtung ➡ große Reichweite, gute Fokussierbarkeit



➤ Laserpulse ||||| hohe Intensitäten in kurzen Zeitskalen (μs – fs)
Kurzzeitdynamik



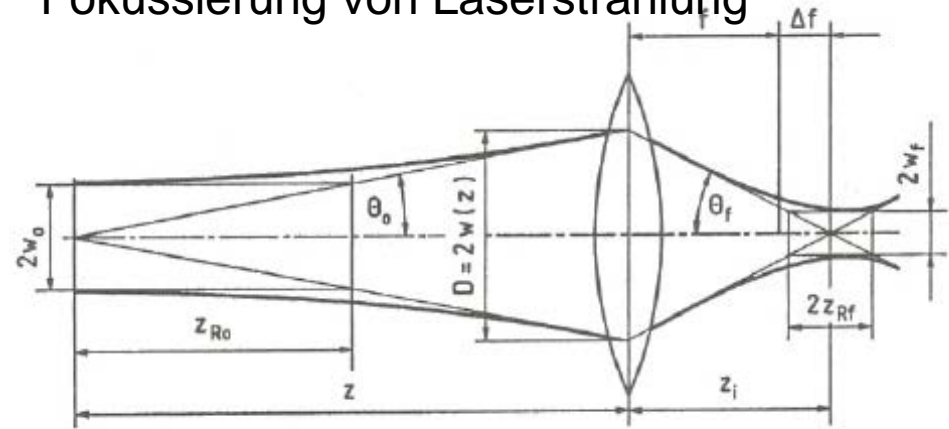
Fokussierbarkeit

Fokussierung von Sonnenlicht



Untergang der Römischen Flotte,
Hitzestrahle des Archimedes,
Syracus, 212 v. Chr.

Fokussierung von Laserstrahlung

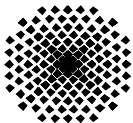


H. Hügel, Strahlwerkzeug Laser, Teubner-Verlag 1992, Stuttgart

Strahlparameterprodukt

$$w_0 \Theta_0 = w_f \Theta_f = \frac{\lambda \cdot M^2}{\pi}$$

- w Strahltaile
- Θ Divergenzwinkel
- M^2 Strahlqualitätsparameter
- konstant bei Durchgang durch optische Elemente
- idealer Gaußstrahl: $M^2 = 1$
- sehr hohe Intensitäten möglich



Reichweite

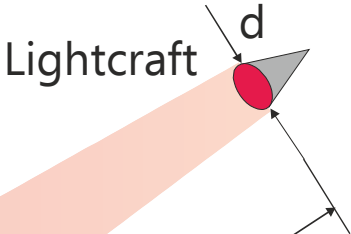
- Begrenzung der Reichweite:**
- **Strahldivergenz**
 - **im Idealfall beugungsbegrenzt ($M^2 = 1$)**

$$R = \frac{\sqrt{Str}}{2,44} \frac{D \cdot d}{\lambda}$$

Turbulent
Atmosphäre

Telescope

R



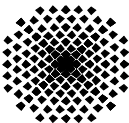
- Str. Strehlzahl (0,3 ... 0,5)
- Transmission
 - Strahlqualität
 - Optische Komponenten

Beispiel: D = 5m, d = 1m, Str=0,5

Laser	λ , μm	R, km
CO ₂	10,6	137
COIL	1,32	1103
Nd:YAG 2f	0,53	2736

LEO: 350 ... 400 km Höhe
➡ 1000 km Reichweite

Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBEP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)

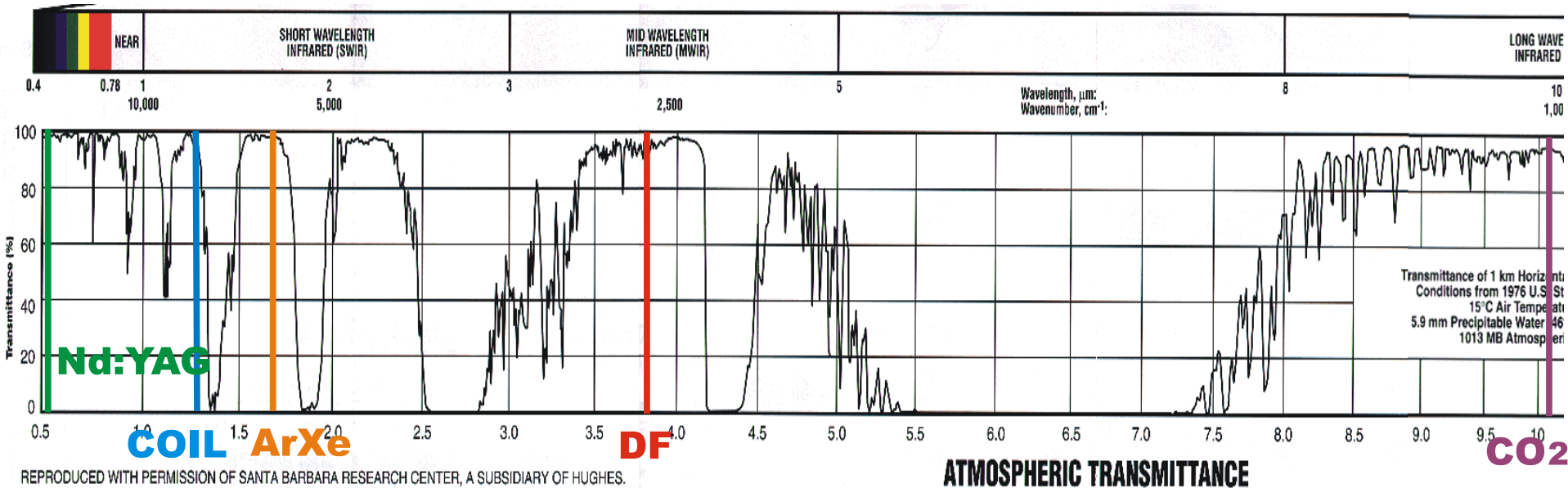


Universität
Stuttgart

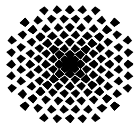
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Atmosphärische Transmission



- Streuung an Partikeln – wetterabhängig, größenabhängig
- Turbulenz
 - Strahlwanderung / -aufweitung
 - Modifikation der Fokussierung
 - insbesondere bei Erhitzung durch Absorption an Partikeln (Thermal Blooming)



Inhalt

1 Einleitung

2 Laser

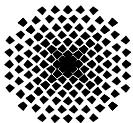
- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

> 3.1 Überblick

- > Systematik und Kenngrößen
- > Photonenantrieb
- > Photovoltaische Laserantriebe
- > Thermische Laserantriebe
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung



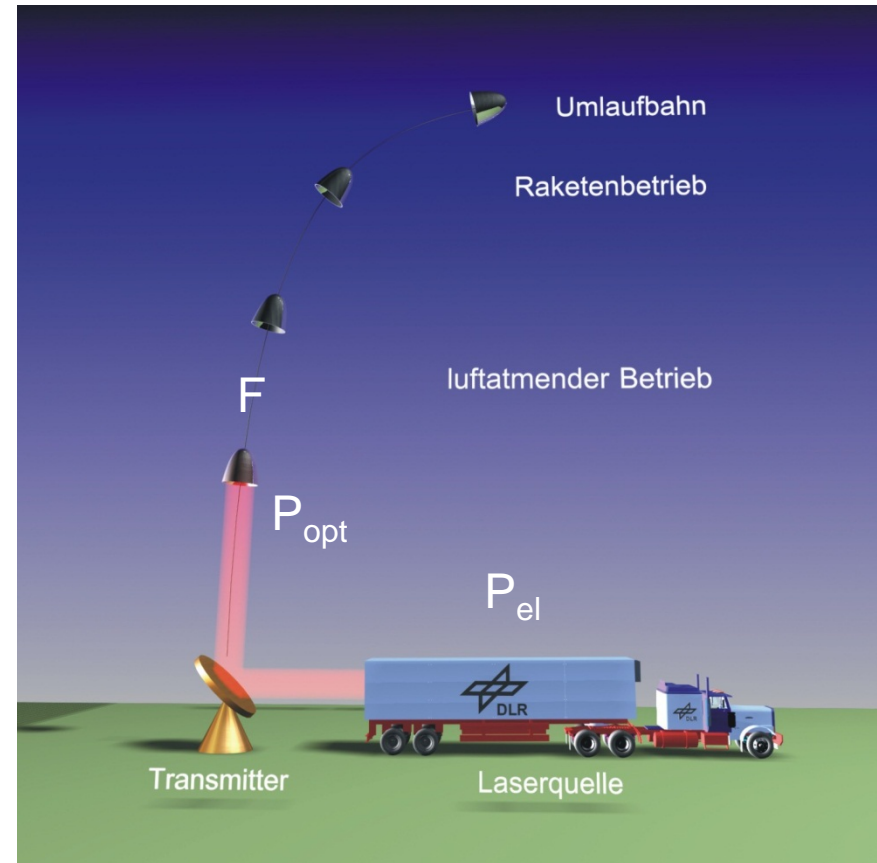
Schub-/Leistungsverhältnis

Impulskoppelkoeffizient (Antrieb):

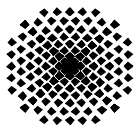
$$c_m = \frac{F}{P_{opt}} = \frac{\Delta p}{E_L}$$

Impulskoppelkoeffizient (System)

$$c_{m,sys} = \frac{F}{P_{el}} = \eta_{el-opt} \cdot c_m$$



Laserbasierter Raketenantrieb

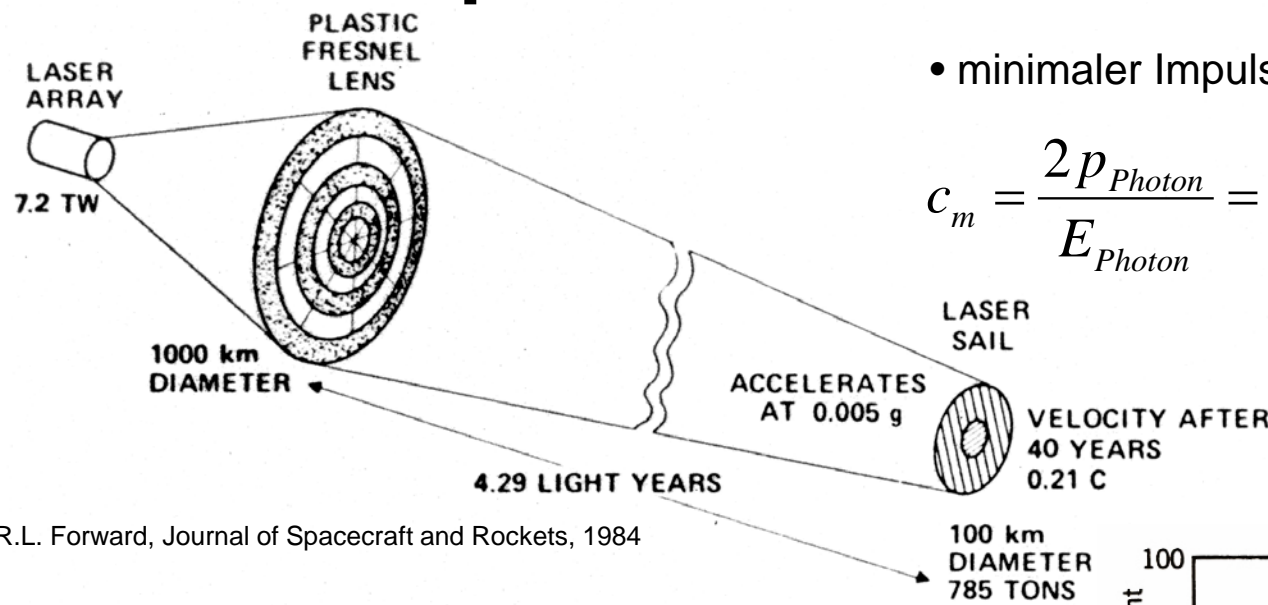


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Konzept für interstellare Missionen



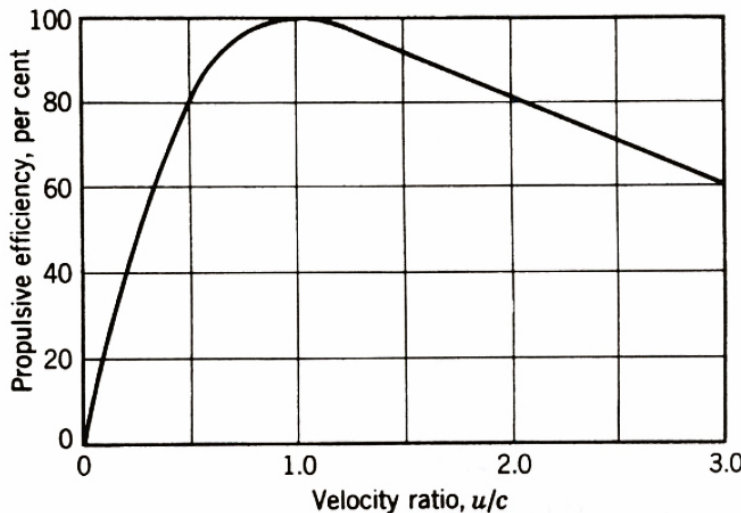
- minimaler Impulsübertrag (→ Mikroantriebe)

$$c_m = \frac{2p_{Photon}}{E_{Photon}} = \frac{2h\nu \cdot c^{-1}}{h\nu} = \frac{2}{c} = 6.7nN / W$$

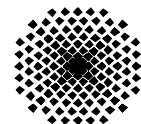
R.L. Forward, Journal of Spacecraft and Rockets, 1984

- hohe Effizienz bei relativistischen Geschwindigkeiten
Beispiel: $v=c/4$

$$\eta_{prop} = \frac{2v / v_{jet}}{1 + (v / v_{jet})^2} = \begin{cases} 47\% & (v_{jet} = c) \\ 0,03\% & (v_{jet} = 5 \text{ km/s}) \end{cases}$$



G.P. Sutton et al, Rocket Propulsion Elements (2001)

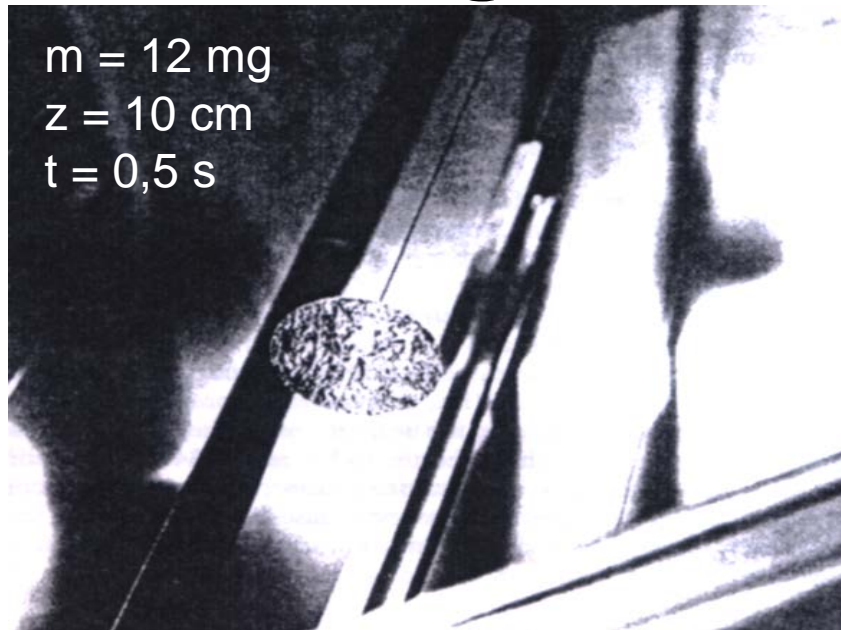


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

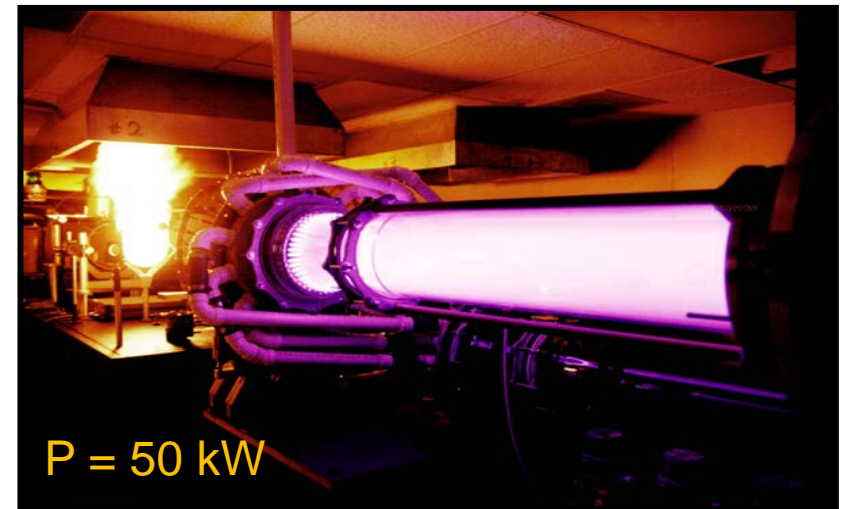


Lasersegel am Hochenergielaser

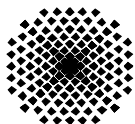


$m = 12 \text{ mg}$
 $z = 10 \text{ cm}$
 $t = 0,5 \text{ s}$

Myrabo et al, Laser-boosted light sail experiments with the
150-kW- LHME II CO₂ laser,
Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)



CO₂-Laser (cw)
Laser Hardened Materials Evaluation Laboratory
Wright Patterson Air Force Base



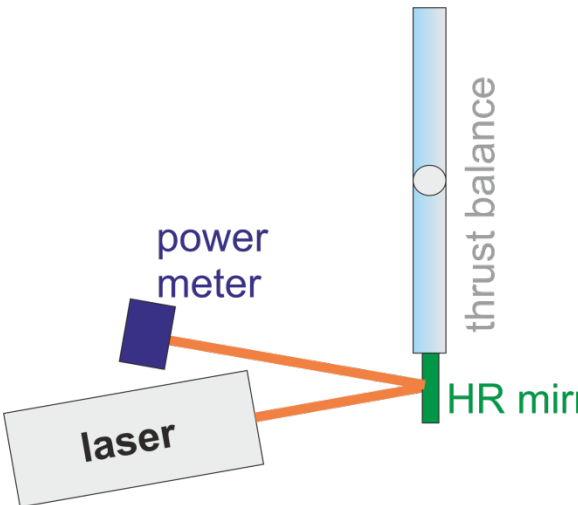
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Exkurs: Kalibration durch Photonendruck

Extra-cavity

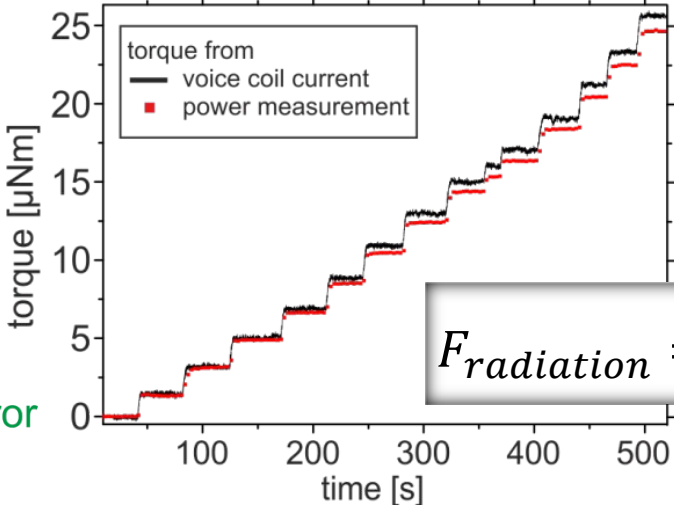


power meter

laser

thrust balance

HR mirror



torque from

- voice coil current
- power measurement

torque [μNm]

time [s]

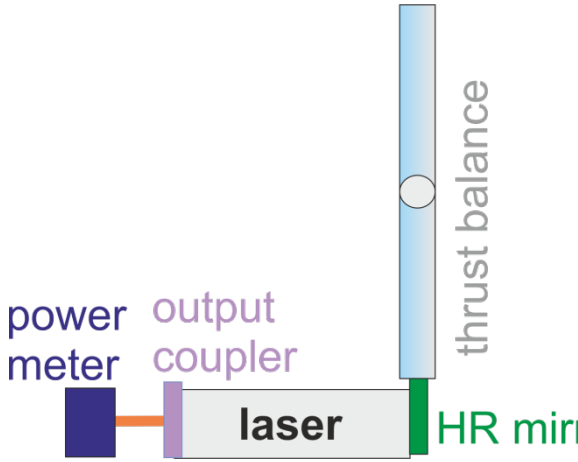
Laser: 1 kW Scheibenlaser

HR: Hochreflektierender Spiegel, $R = 99.98\%$

Einfallswinkel $\vartheta = 10^\circ$

$$F_{\text{radiation}} = (1 + R) \cdot \frac{P_{\text{ext}}}{c} \cdot \cos(\vartheta)$$

intra-cavity



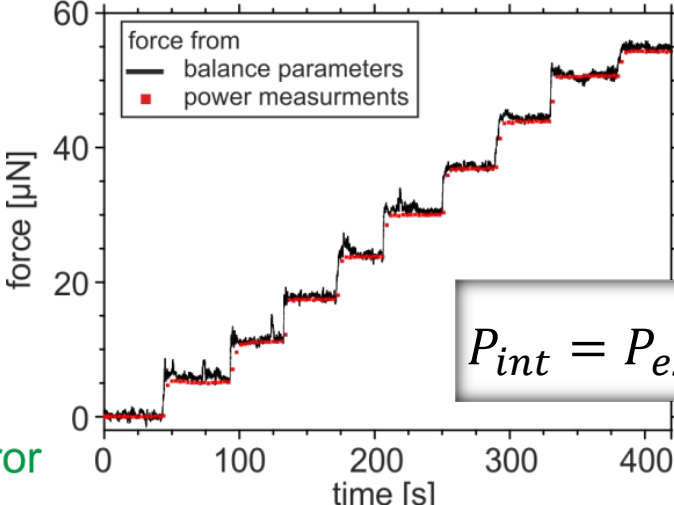
power meter

output coupler

laser

thrust balance

HR mirror



force from

- balance parameters
- power measurements

force [μN]

time [s]

HR-Spiegel = Endspiegel der Laserkavität

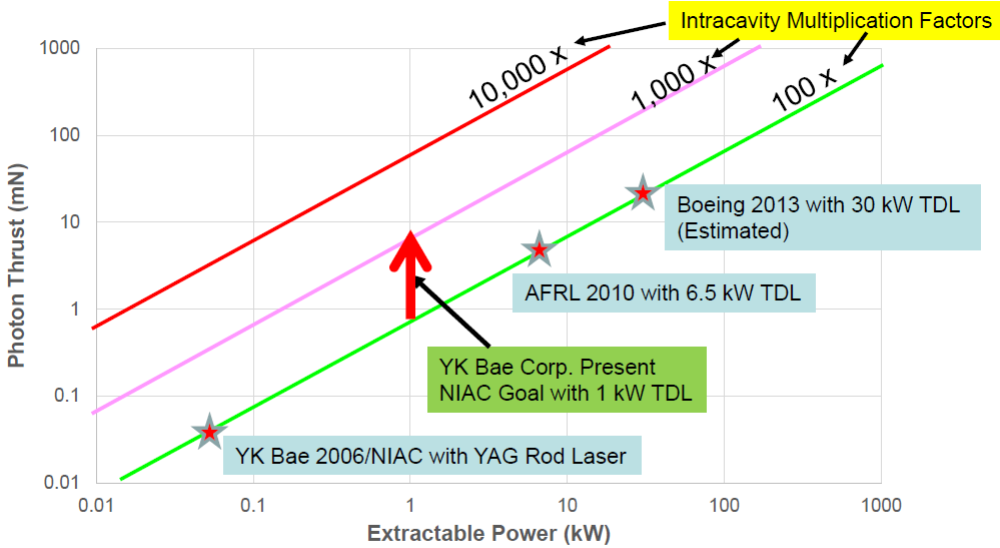
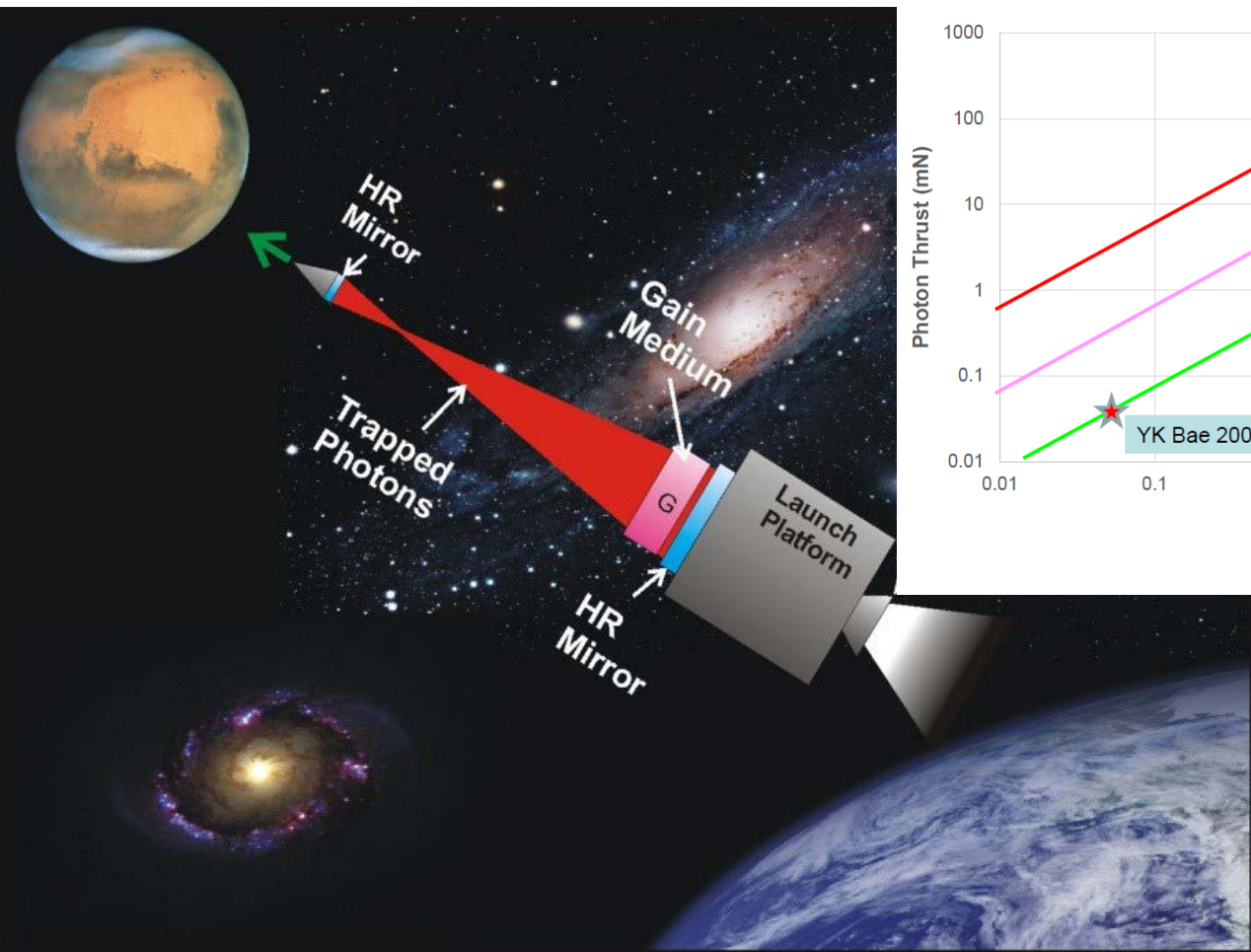
Auskoppelspiegel: $T = 2.4\%$

$\vartheta = 0^\circ$

$$P_{\text{int}} = P_{\text{ext}} \frac{1 - T}{T} \approx 41 \cdot P_{\text{ext}}$$

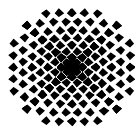
S. Karg et al., Laser Propulsion Research Facilities at DLR Stuttgart, Proceedings of HPLA/BEP 2014

Photonenantrieb – intra-cavity



TDL: Thin Disk Laser

Y.K.Bae, The Past, Present and Future of Photon Propulsion, Proceedings of HPLA/BEP 2014

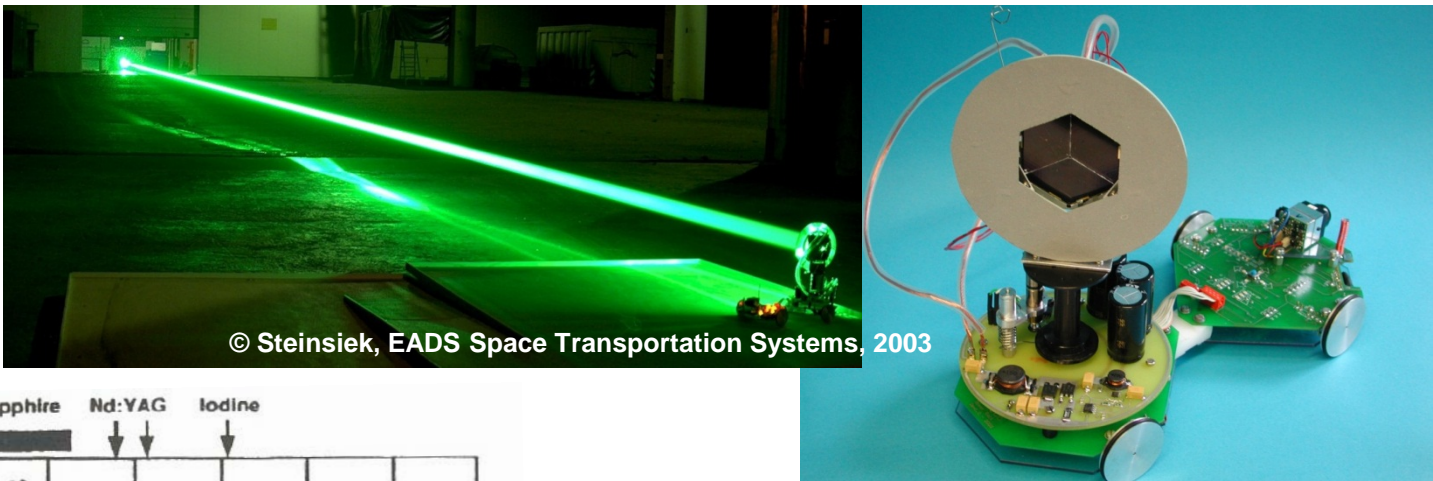


Universität
Stuttgart

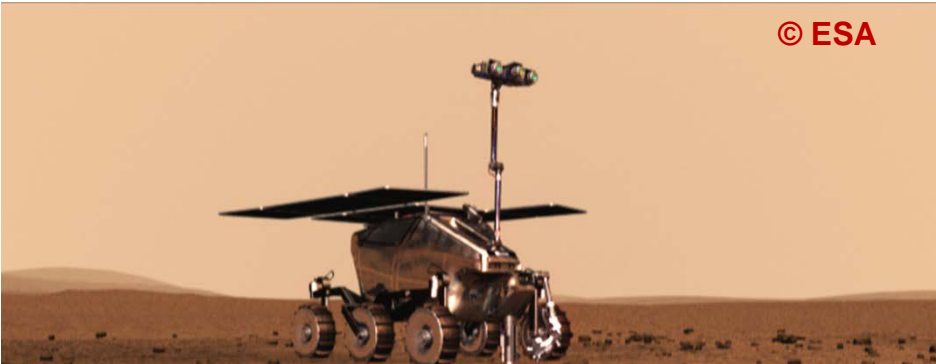
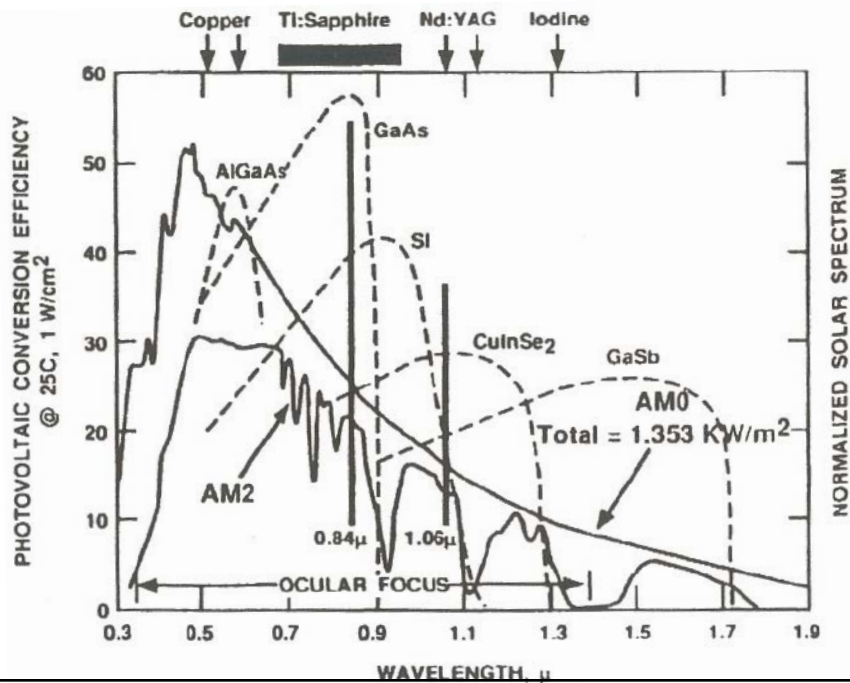
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Energieversorgung im Planetenschatten

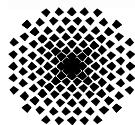


© Steinsiek, EADS Space Transportation Systems, 2003



© ESA

W.F. Krupke et al, DPAL: A new class of lasers for cw power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths, AIP Conf. Proc. **702**, 367-377 (2004)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



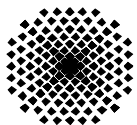
3 Antriebskonzepte > 3.1 Überblick > 3.1.3 Photovoltaische Laserantriebe

Space Elevator



J.T. Kare et al, Laser Power Beaming on a Shoestring,
AIP Conf. Proc. **997**, 97-108 (2008)

B.C. Edwards, The Space Elevator: an Ideal Application for the
Free Electron Laser, Proc. SPIE **4632**, 134-140 (2002)

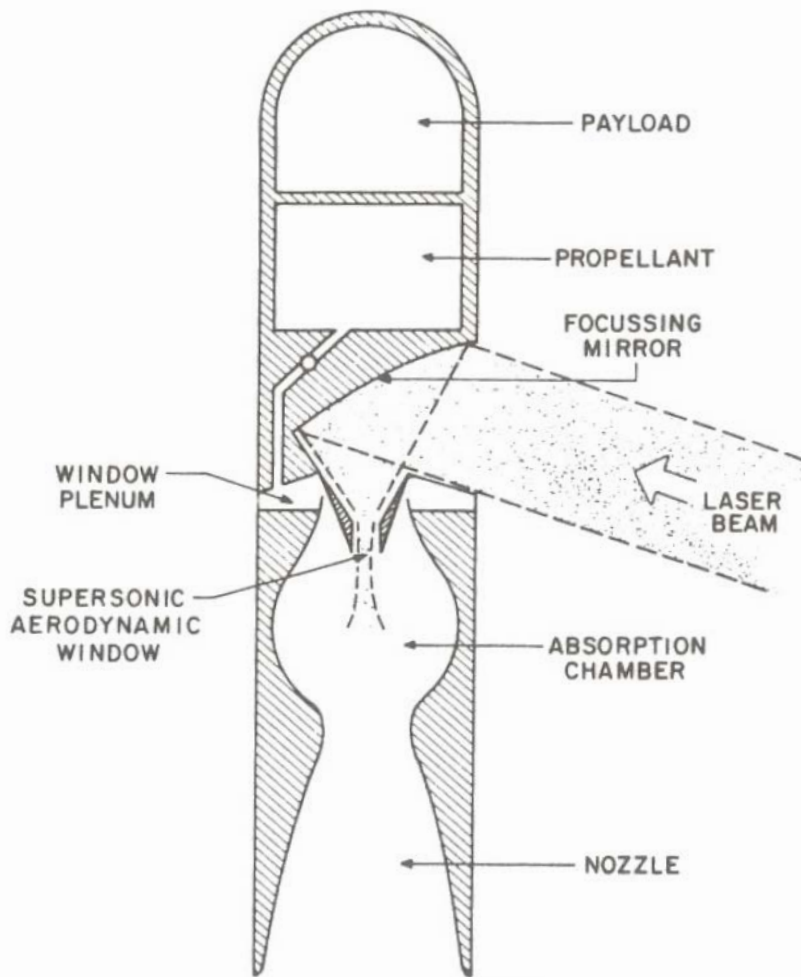


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Thermische Laserantriebe

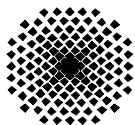


Funktionsprinzip:

- Aufheizen eines Treibstoffes durch fokussierten Laserstrahl
- Schub durch Expansion

Laserquelle: cw oder gepulst

R.F. Weiss et al., Laser Propulsion, Astronautics and Aeronautics, March 1979: 50 – 58



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Inhalt

1 Einleitung

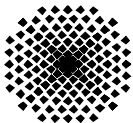
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

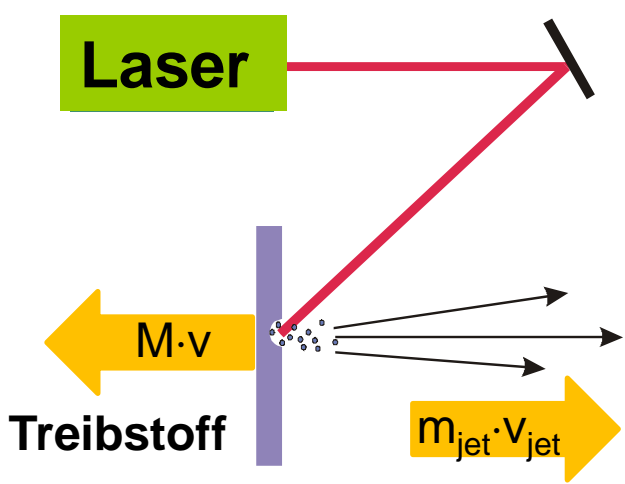
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > **3.2 Ablative Laserantriebe**
 - > 3.2.1 Antriebsprozess
 - > 3.2.2 Mikroantriebe USA
 - > 3.2.3 Mikroantrieb DLR
 - > 3.2.4 Hybride laser-el. Antriebe
 - > 3.2.5 Beseitigung von Weltraummüll
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung

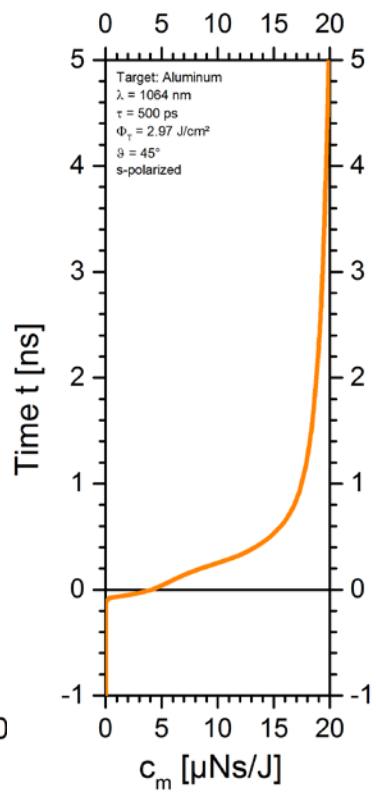
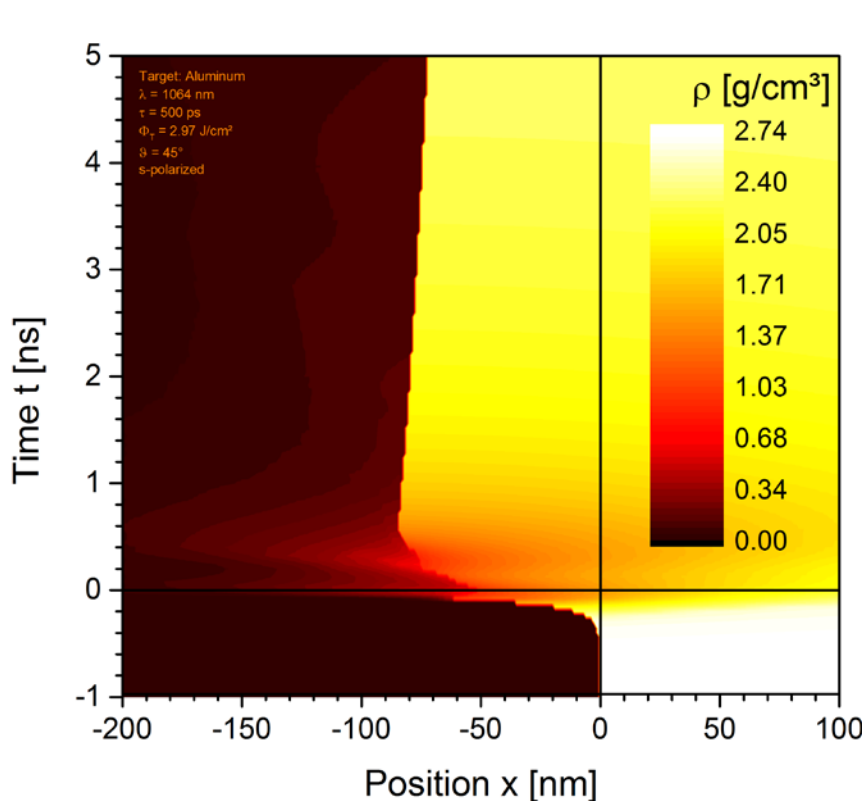


Laserinduzierter Ablationsprozess



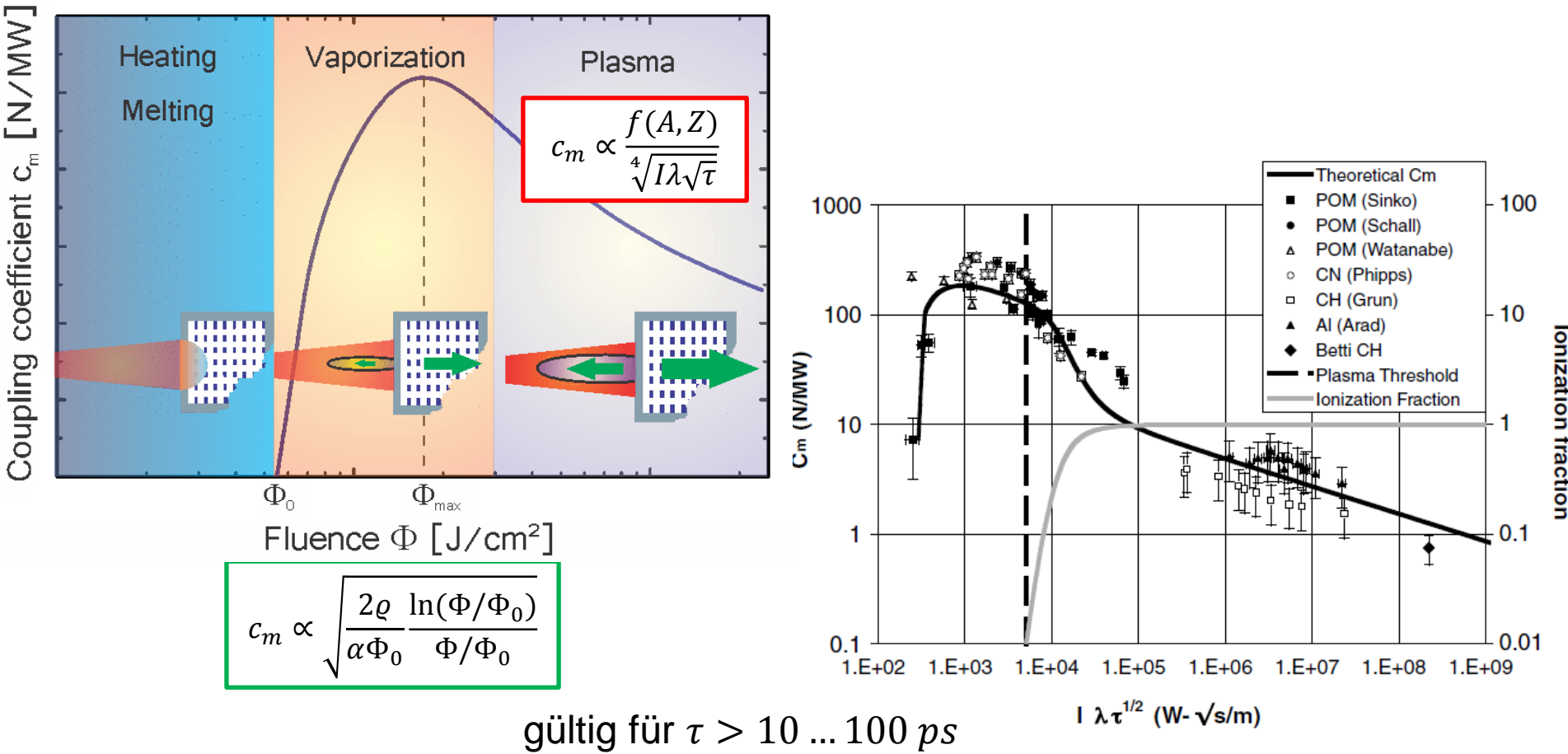
Laser Ablation

- Schmelzprozesse
- Verdampfung
- Ionisierung
- Plasmabildung
- Thermische Expansion
- Impulsübertrag



Hydrodynamische Simulationen mit Polly-2T (JIHT-RAS)

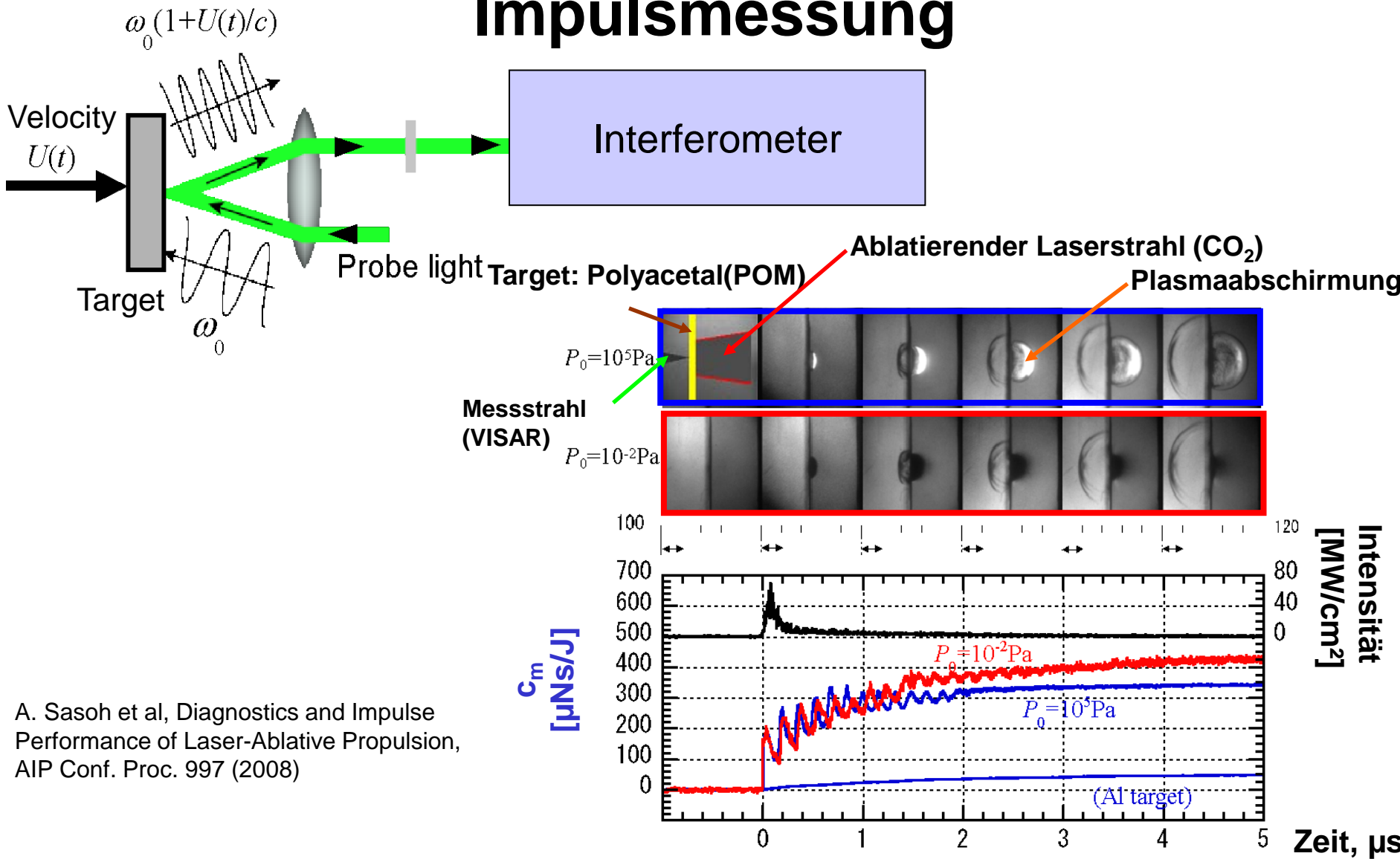
Impulskoppelkoeffizient



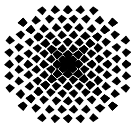
B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014

Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26**(4), 609-637 (2010)

Impulsmessung



A. Sasoh et al, Diagnostics and Impulse Performance of Laser-Ablative Propulsion, AIP Conf. Proc. 997 (2008)

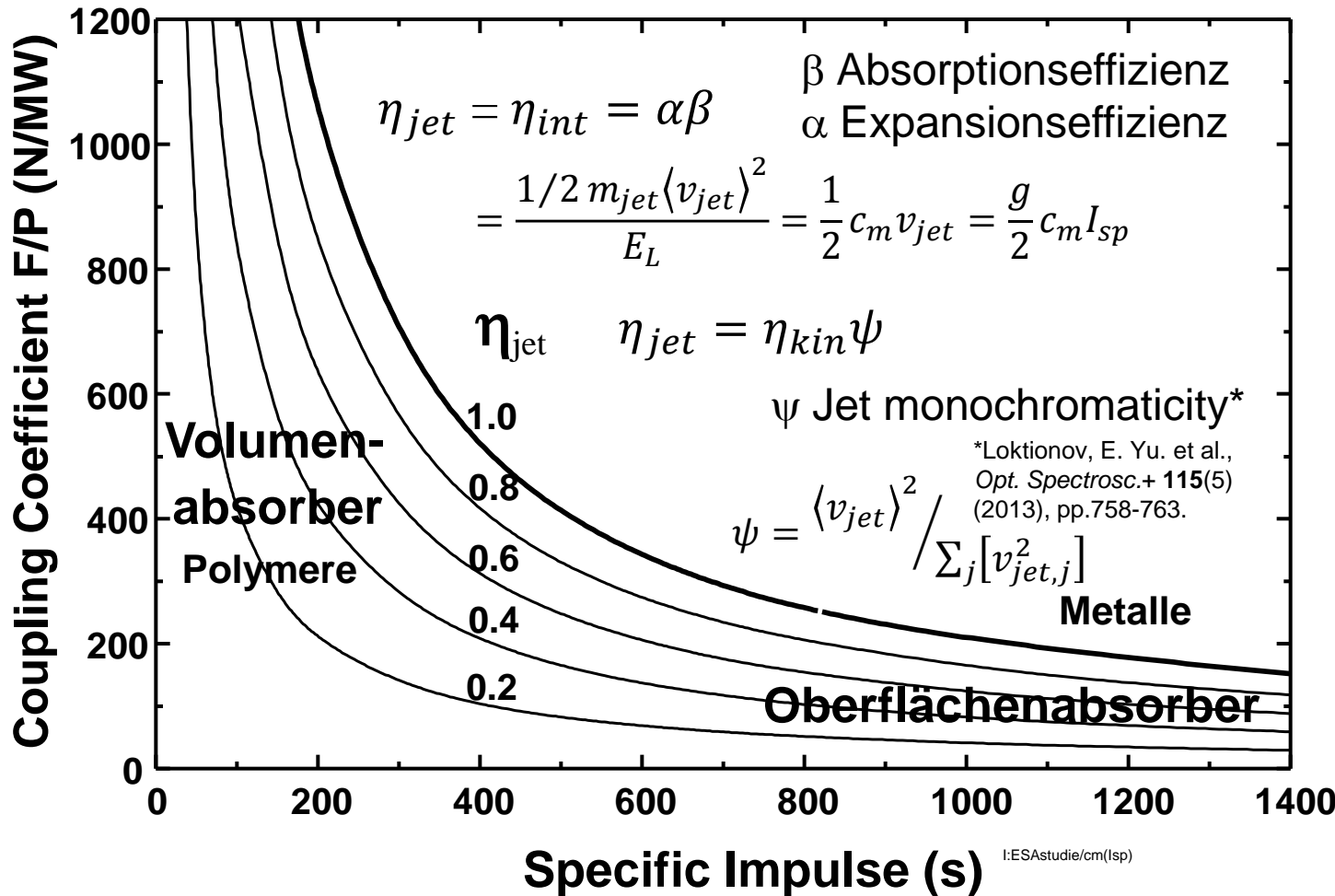


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

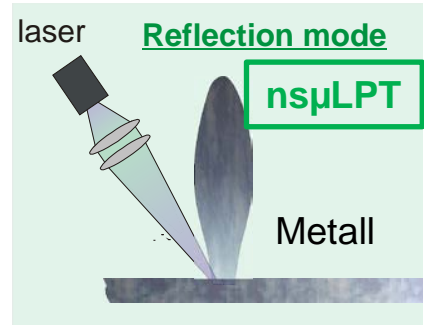
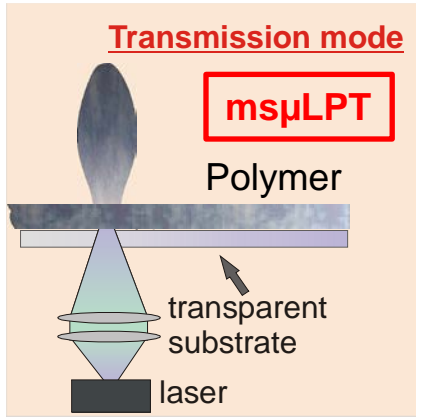


Innere Antriebseffizienz (Treibstoff-/Jeteffizienz)



Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBEP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)

Konzepte

Antrieb	Masse [kg]	Min.Impulsbit [μNs]	I _{sp} [s]	C _{m,sys} [μN/W _{el}]	T [μN]
 nsμLPT	0,8	4·10 ⁻⁵	3000	40	100
 msμLPT	0,5	0,05	250	550	10000
Vergleich:					
μPPT	1,0	2	1000	20	30
FEEP	8,7	1	9000	15	1400

Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)

T-Mode Micro Laser Plasma Thruster (ms μ LPT)

Getestete Treibstoffe:

PVC, sowie exotherme
Polymere (C-dotiert)

T 0,14 ... 0,29 mN (PVC:C)
2,8 ... 7,2 mN (EP:C I)

c_m 60 ... 120 μ N/W (PVC:C)
1170 ... 3000 μ N/W (EP:C)

I_{sp} 650 ... 750 s (PVC:C)
160 ... 540 s (EP:C)

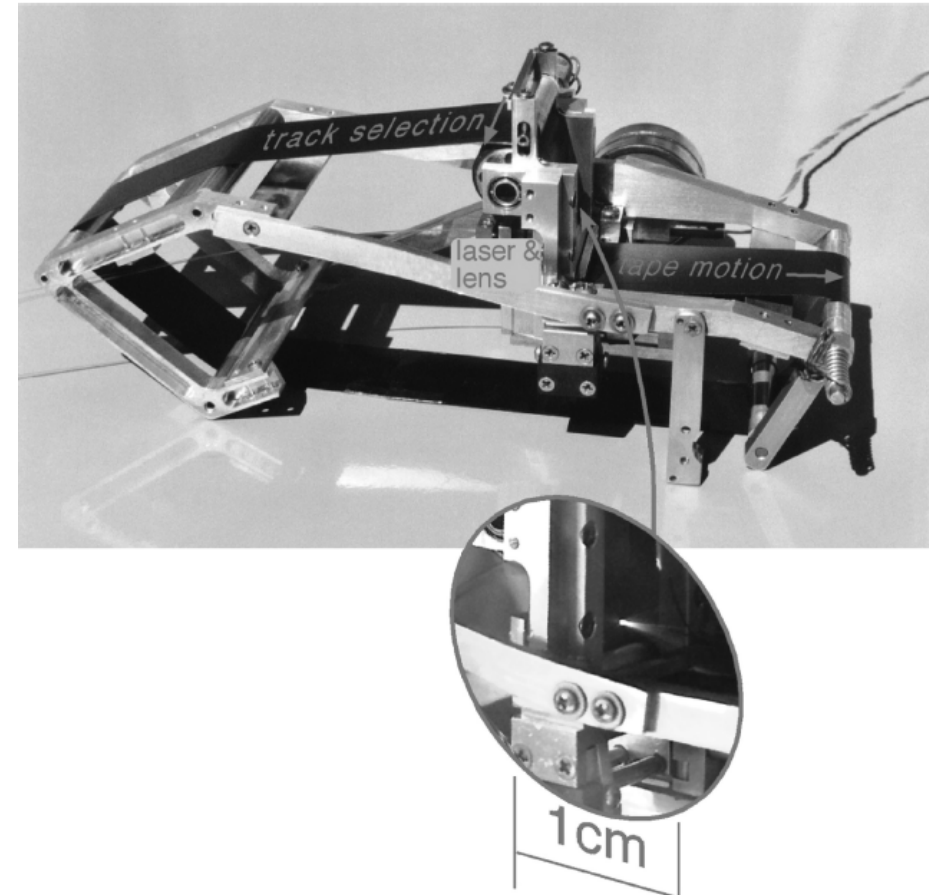
Lasertyp: Diodenlaser

τ 2 ms

λ 920 nm

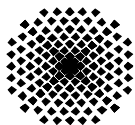
f_{rep} 80 Hz

E_L 30 mJ



Phipps et al, Micropropulsion using a Laser Ablation Jet,
J. Prop. Pow. **20(6)**, 1000-1011 (2004)

Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered
Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



R-Mode Micro Laser Plasma Thruster (nsμLPT)

Getestete Treibstoffe:

Aluminium, Gold

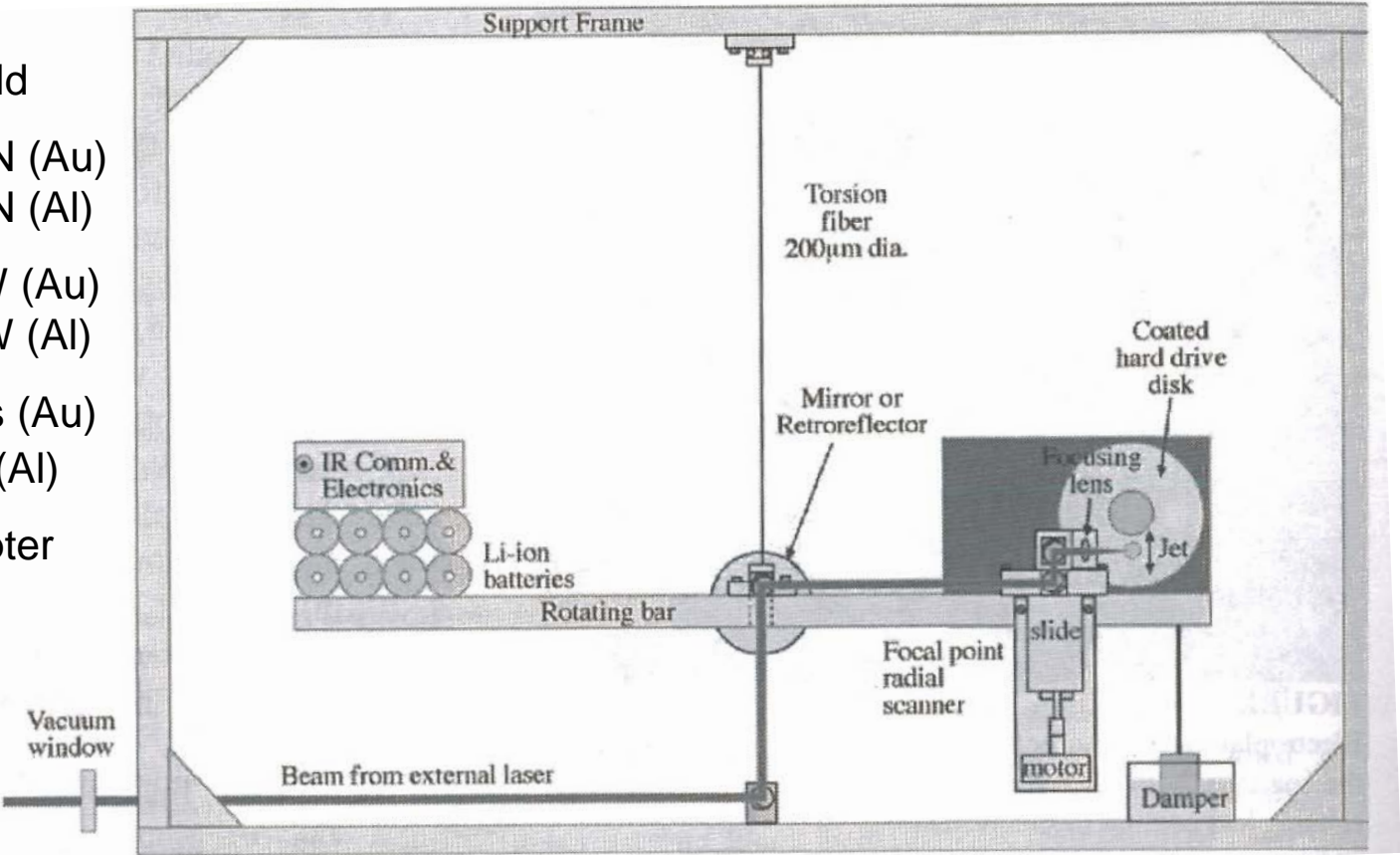
T 0,47 ... 0,63 μN (Au)
0,94 ... 1,88 μN (Al)

c_m 7,2 ... 68 $\mu\text{N/W}$ (Au)
32 ... 111 $\mu\text{N/W}$ (Al)

I_{sp} 3664 ... 7905 s (Au)
822 ... 6610 s (Al)

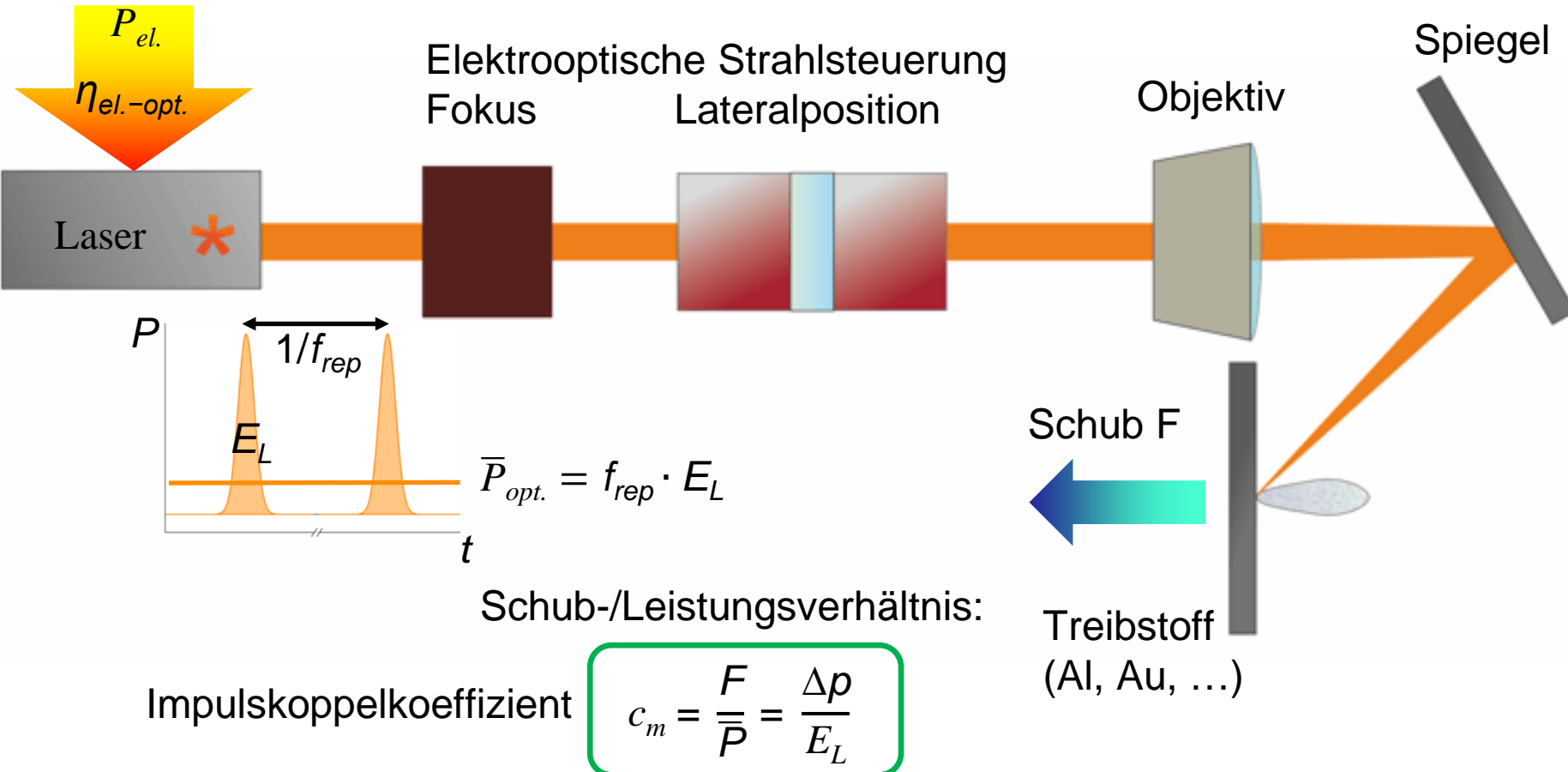
Lasertyp: Diodengepumpter
Nd:YAG-Laser

τ 5 ns
 λ 1064 nm
 f_{rep} 10 Hz
 E_L 1 ... 20 mJ

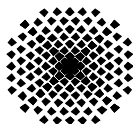


Phipps et al, A ns-Pulse Laser Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 235-246 (2006)

Trägheitsfreies Antriebskonzept



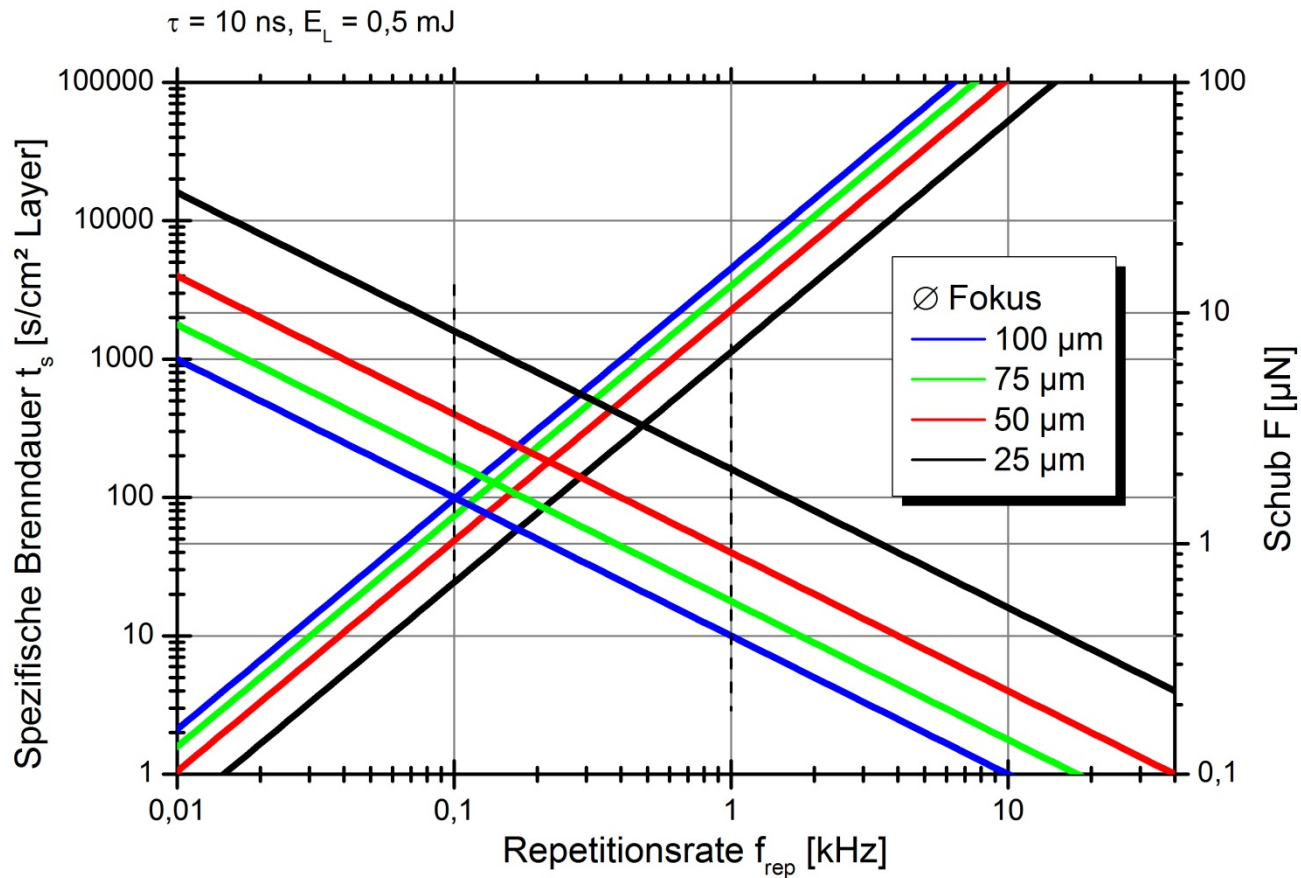
Eckel et al, *Tailoring Laser Propulsion for Future Applications in Space*,
High Power Laser Ablation 2010, AIP Conf. Proc. **1278**, 677-688 (2010)



Schubcharakteristik

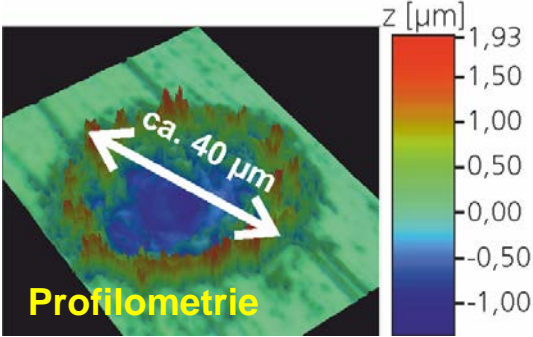


Stablaser
 $\bar{P}_{max} = 35\text{ W}$

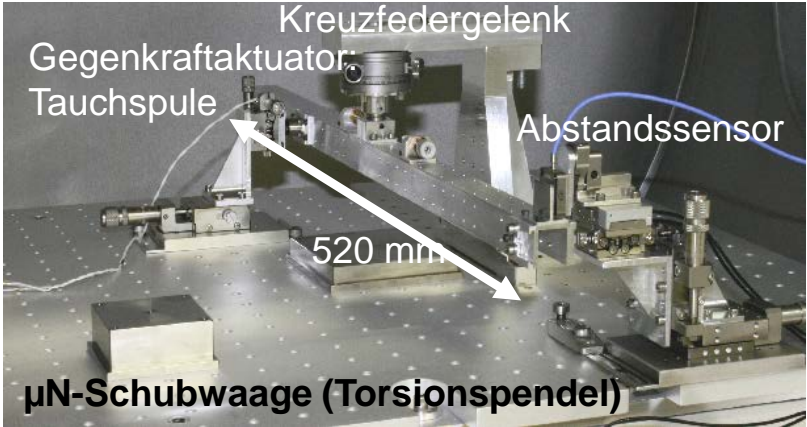
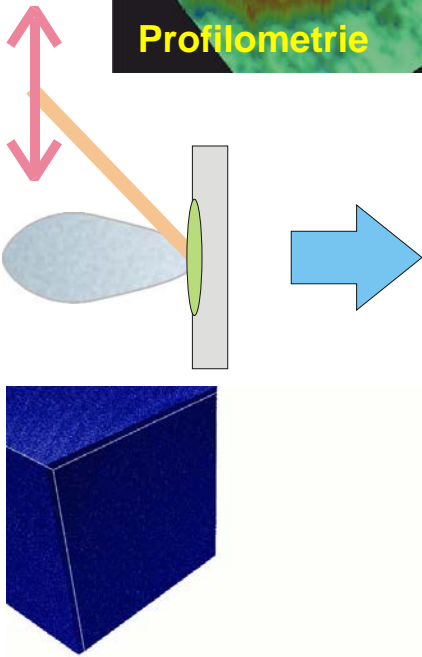
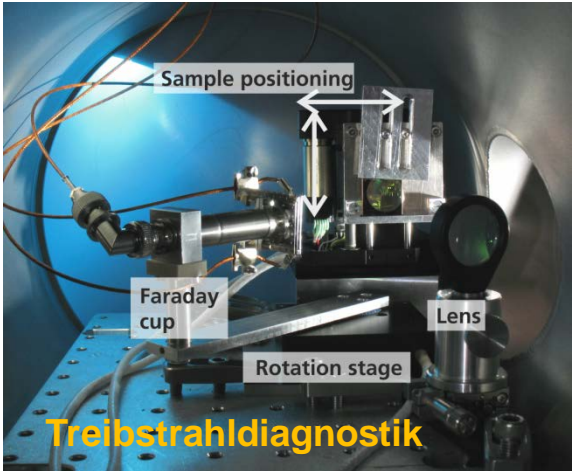


Modellrechnung mit experimentellen Werten aus
Phipps et al, Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers,
J. Appl. Phys. 64(3), 1083-1096 (1988)

Forschungsgebiete

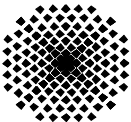


- Kenngößen:**
- Impulsübertrag
 - Ablatierte Masse
 - Oberflächenqualität
 - Jet: Geschwindigkeitsverteilung
 - Divergenz

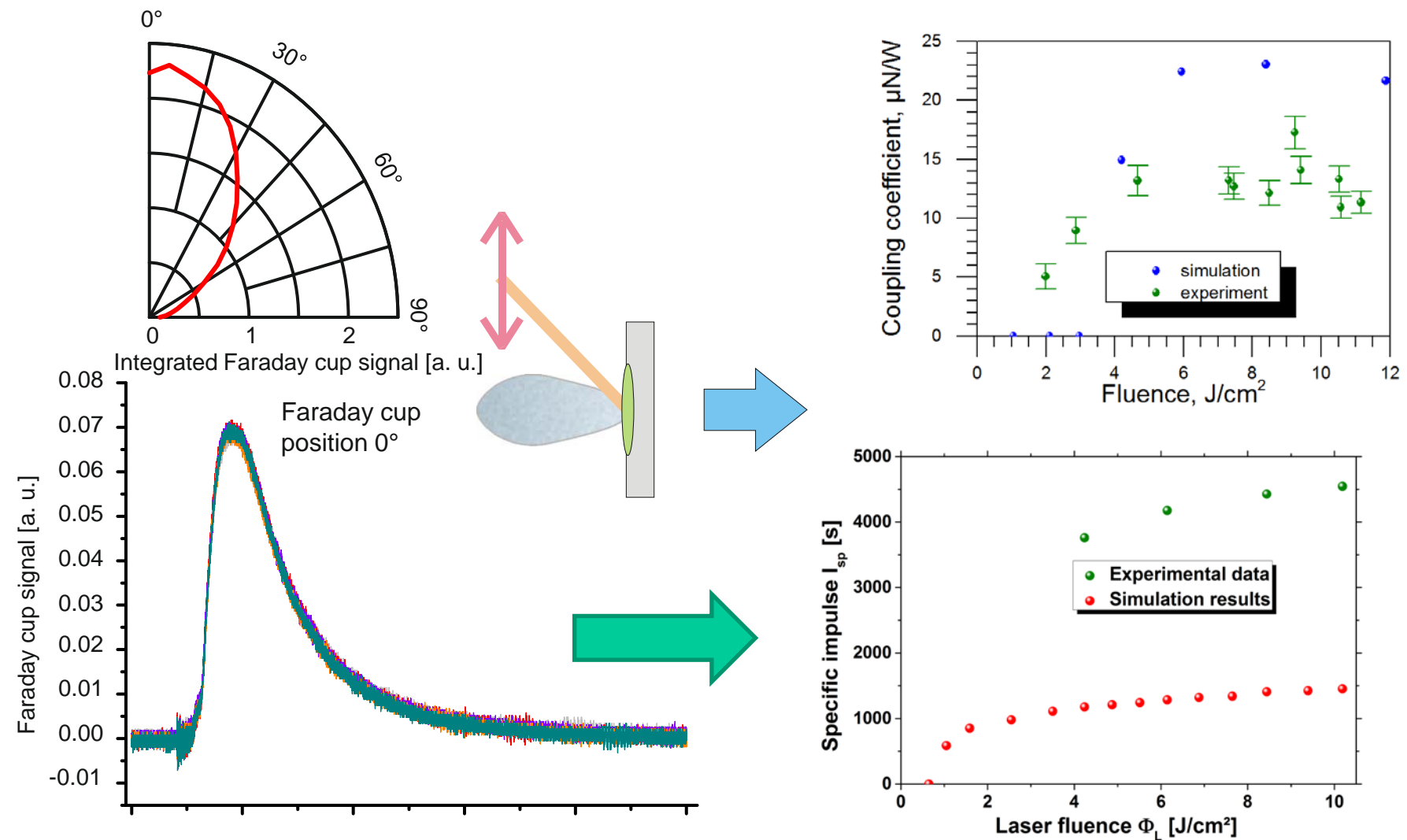


Ablationsprozess:
Molekulardynamik (IMD) / Hydrodynamik (Polly-2T)
Plasmajet: DSMC-PIC-Simulation (PICLas)

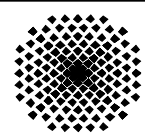
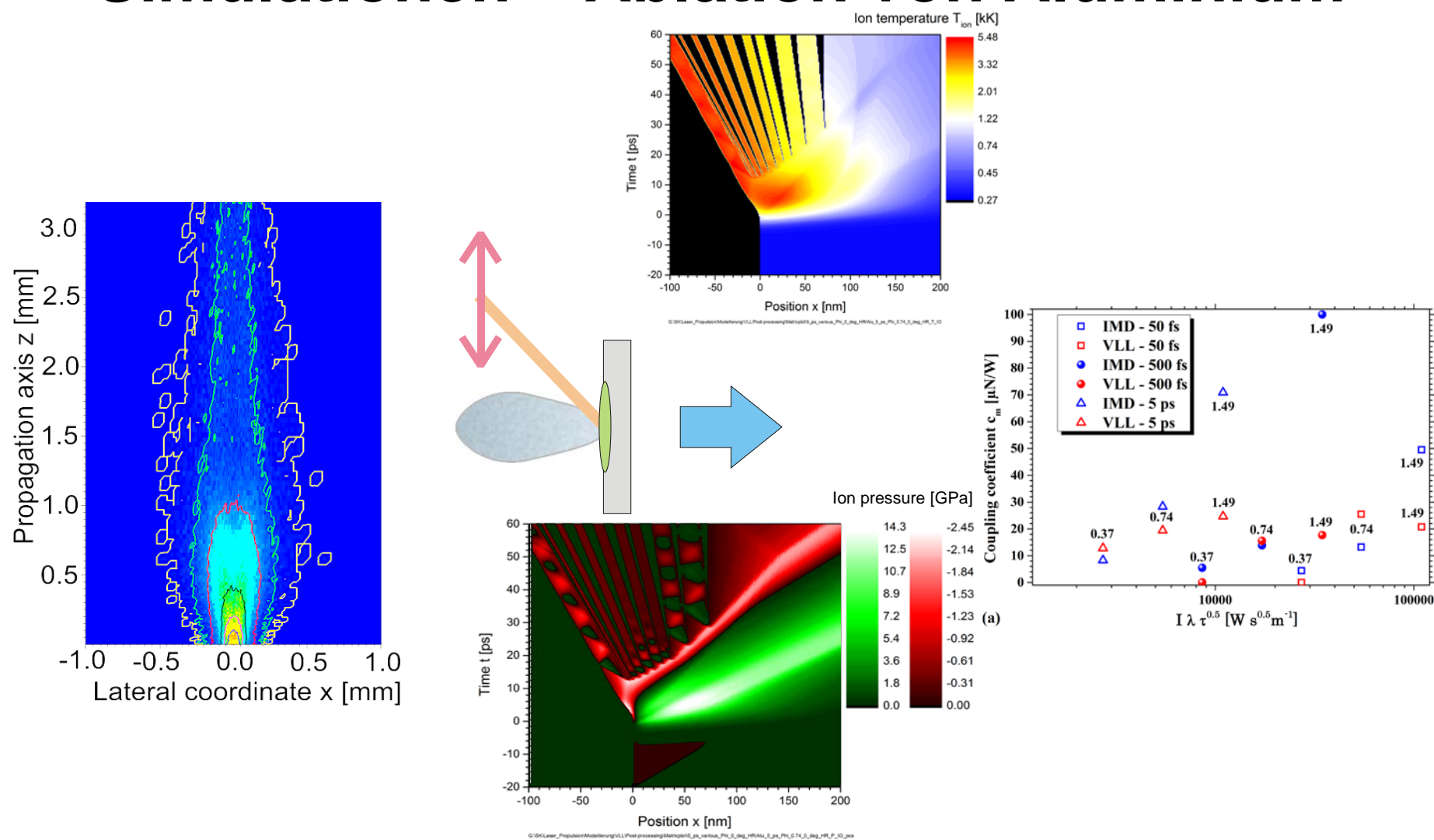
- Optimierungsparameter:**
- Pulsdauer, -profil
 - Wellenlänge
 - Ablationsschema
 - Material



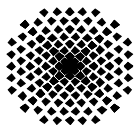
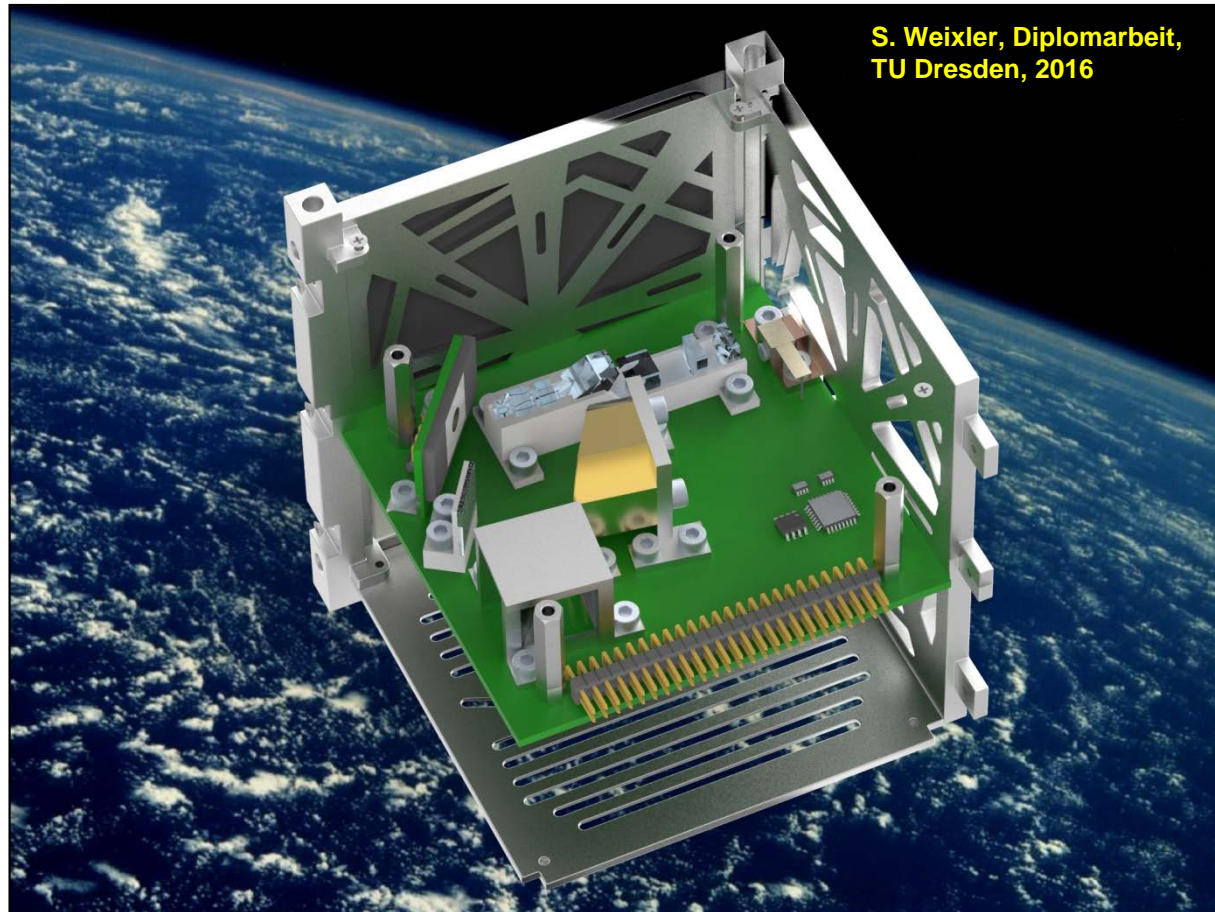
Experimente – Ablation von Aluminium



Simulationen – Ablation von Aluminium



Demonstrator-Entwicklung für Cubesat

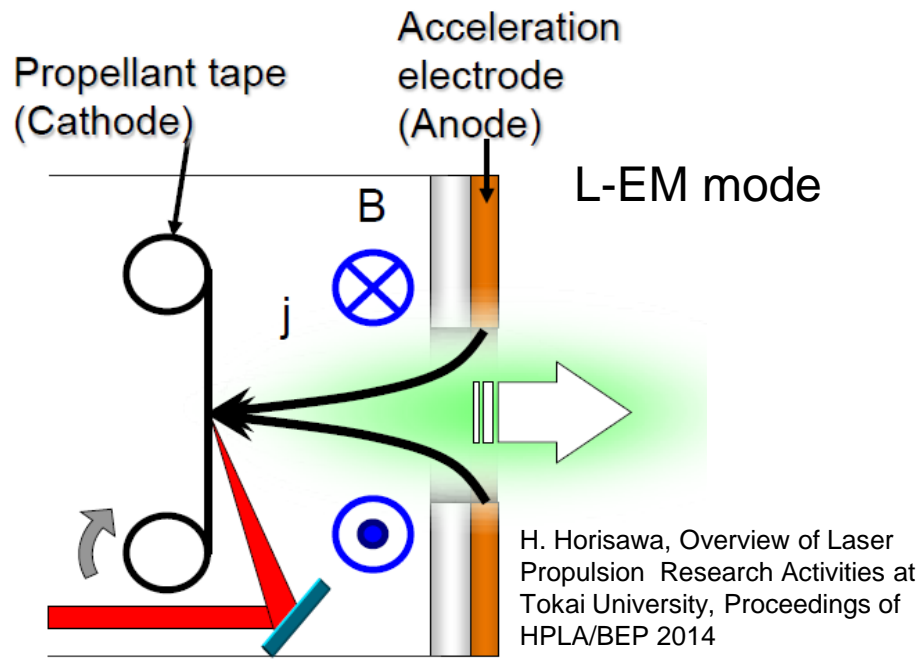


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



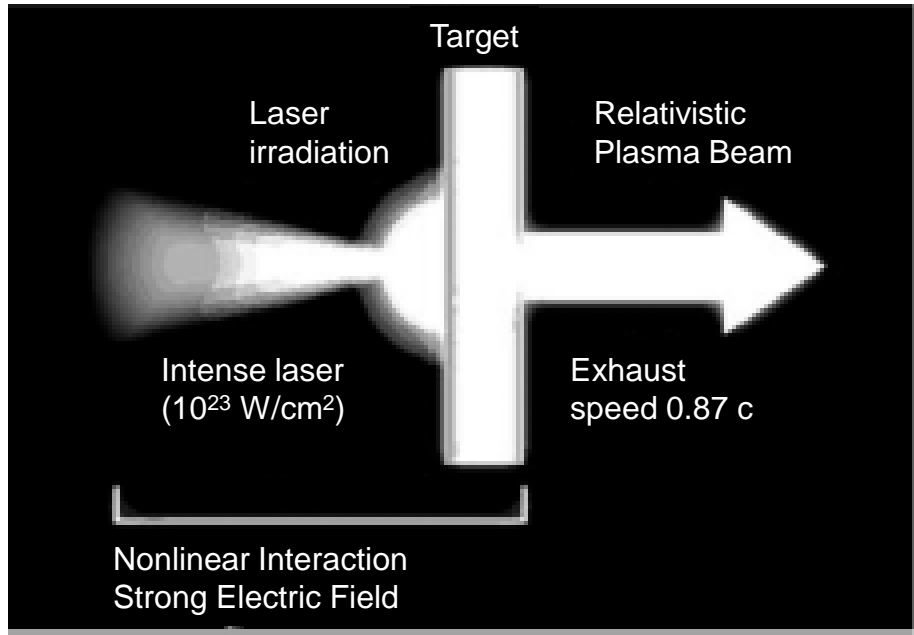
Antriebskonzepte



elektrostatisch (L-ES mode)

+ *el. Entladung: elektrothermisch (LT mode)*

+ *große Stromstärken:*
elektromagnetisch durch Selbstinduktion (L-EM mode)



relativistisch

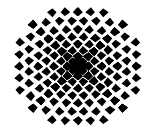
Pulsdauer: 10 fs ... 5 ps

Schichtdicke: ~ 100 nm

Coulomb-Explosion

- Erzeugung hochenergetischer Elektronen
- Aufbau eines elektrischen Feldes
- Expansion der Ionen in Plasmastrahl

Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26(4)**, 609-637 (2010)

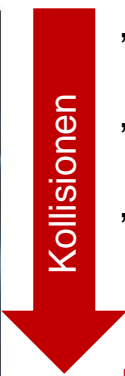


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Bedrohung durch Weltraummüll

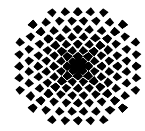


- Größenordnungen letaler Objekte:
- „Autos“ – 1%
einfaches Tracking und Ausweichen
 - „Radkappen“ – 3%, > 10 cm, < 2 kg
schwieriges Tracking und Ausweichen
 - „Granatsplitter“ – 96 %, > 1 g
derzeit kein Tracking,
kein Ausweichen möglich

Kessler- Syndrom



nach: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Konzepte

Weltraumgestütztes System Schall 1990

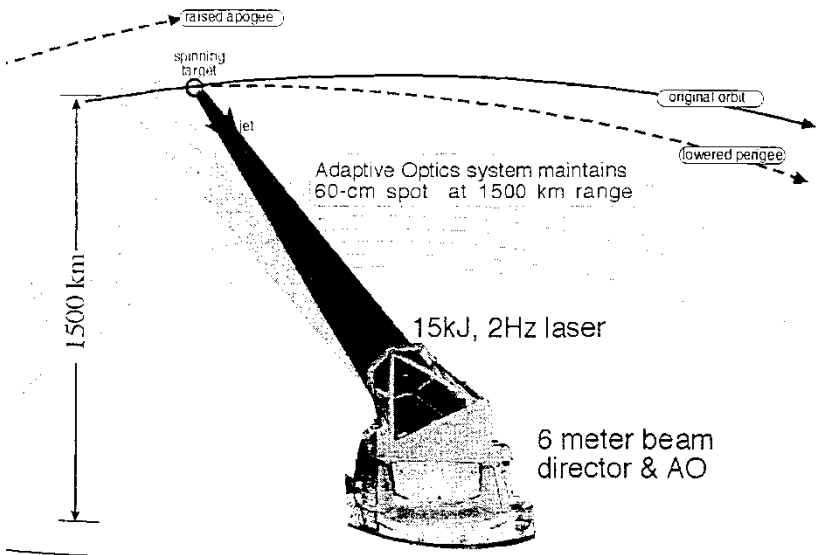
Laser: 30 ... 100 kW, 100 Hz
Range: < 100 km



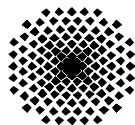
nach: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014

Erdgestütztes System (Orion) Phipps et al. 1996

Laser: 15 kJ, 2 Hz
Range: 1500 km



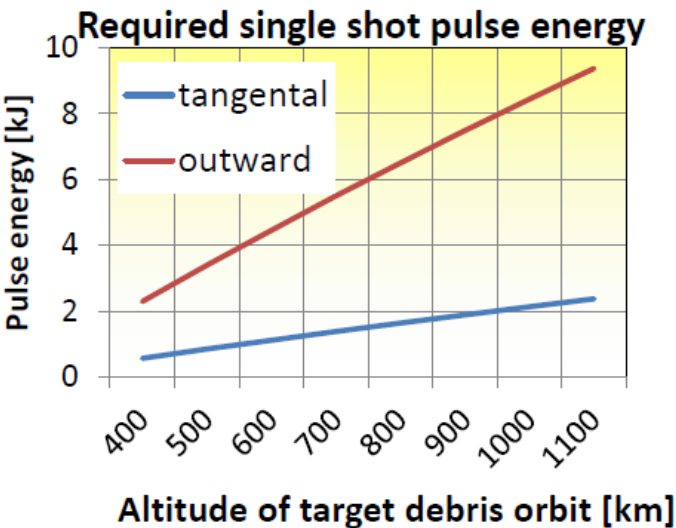
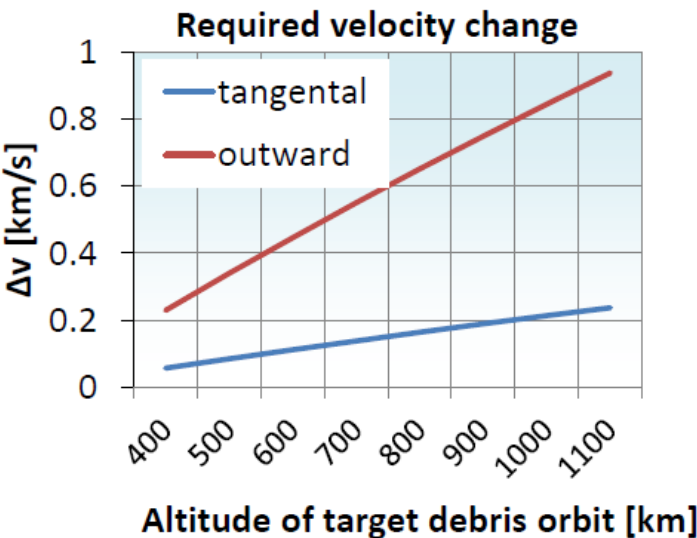
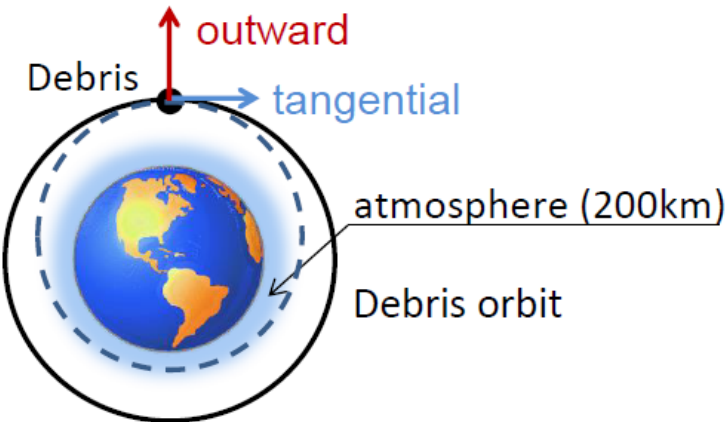
EU-Projekt 2011 – 2014 (F, D, E, P)
<http://www.clean-space.eu/>



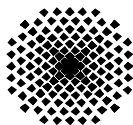
Weltraumgestützte Beseitigung

Conditions:

- Debris' mass 1 g
- Momentum coupling coefficient $C_m=10[\text{dyn/W}]=100\text{N/MW}$
- atmospheric re-entry begins at the altitude of 200 km



K. Kawakami, Phase Conjugate Light Generation for Space Debris Removal, Proceedings of HPLA/BEP 2014



CLEANSPACE – Detection, Ranging & Tracking

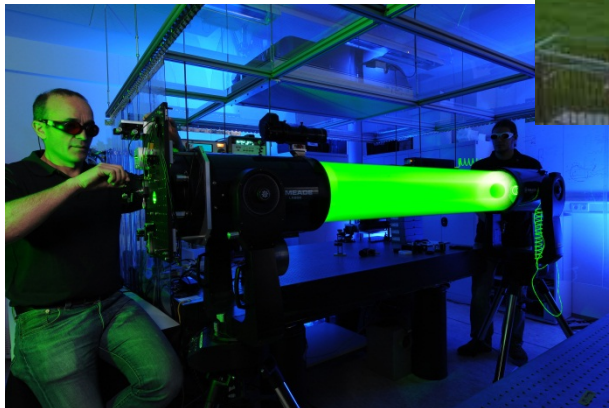
- ▶ Detektion von Weltraummüll mit $\varnothing \geq 1 \text{ cm}$
- ▶ Tracking-Genauigkeiten $\leq 100 \text{ nrad}$
- ▶ Adaptive Optik zu Turbulenzkompensation
- ▶ Laser-ranging (Time-of-flight)



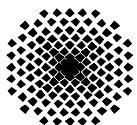
Spur eines Debris-Objekts



Beobachtungsstation
Uhlandshöhe, Stuttgart



Laborexperiment

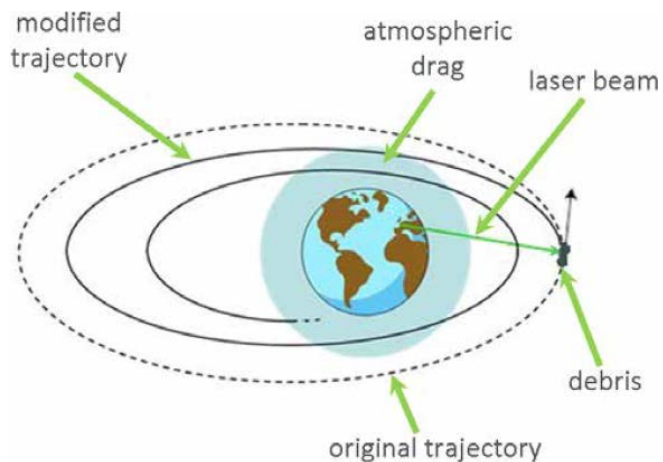
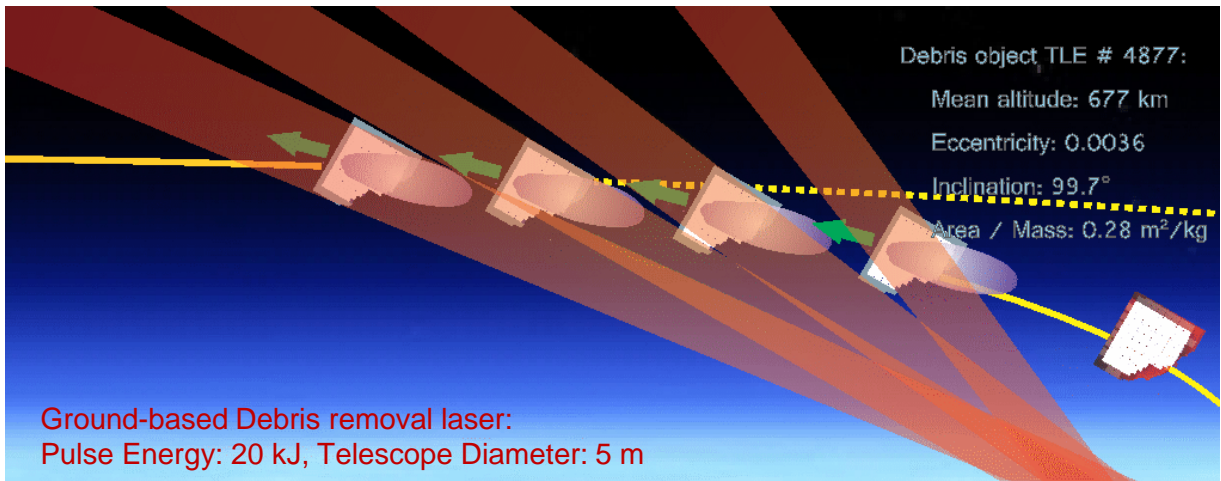


Universität
Stuttgart

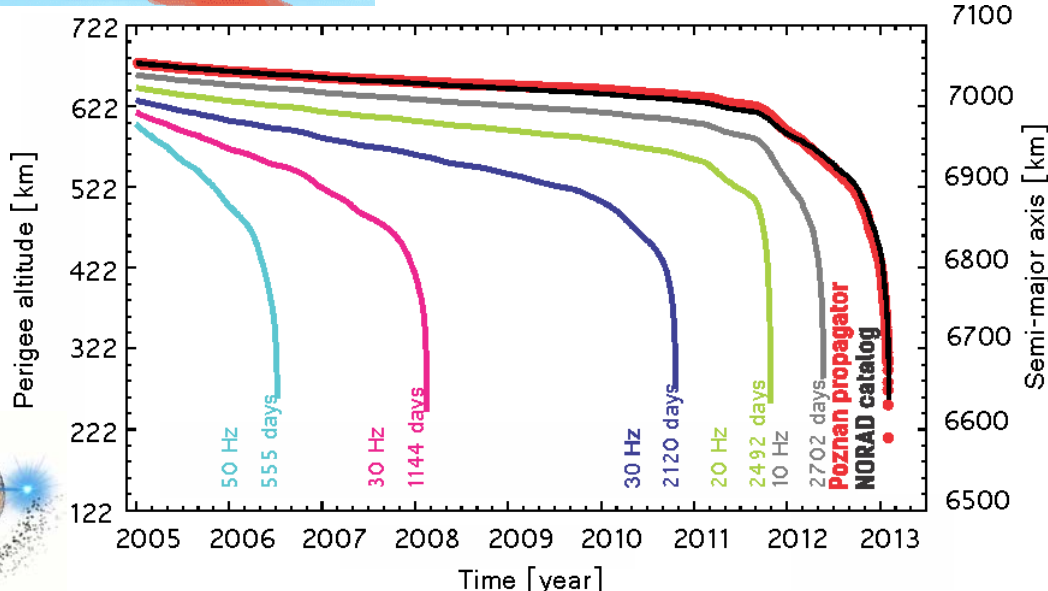
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



CLEANSPACE – Beseitigung von Debris

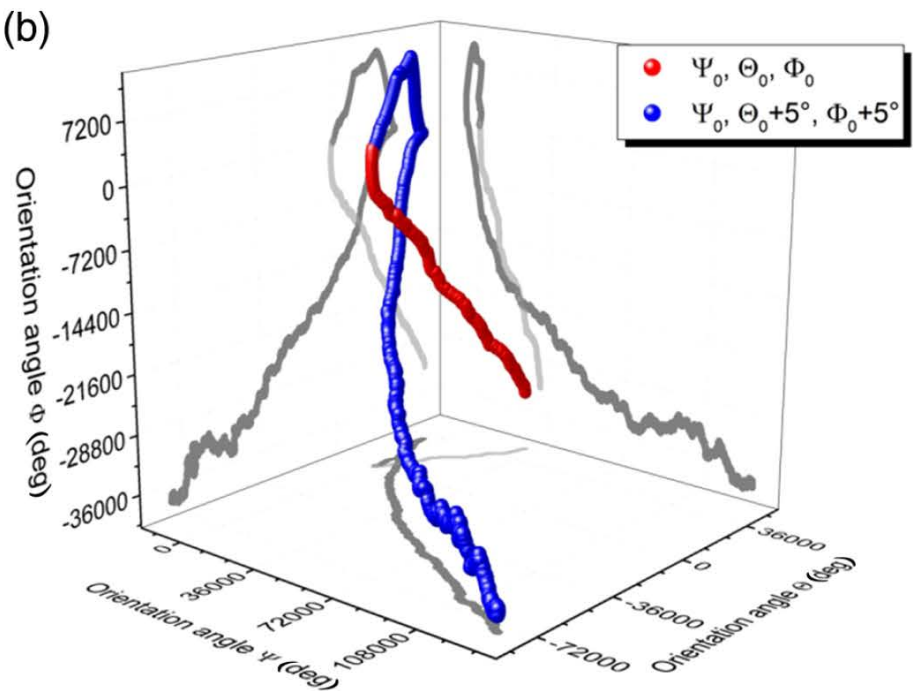
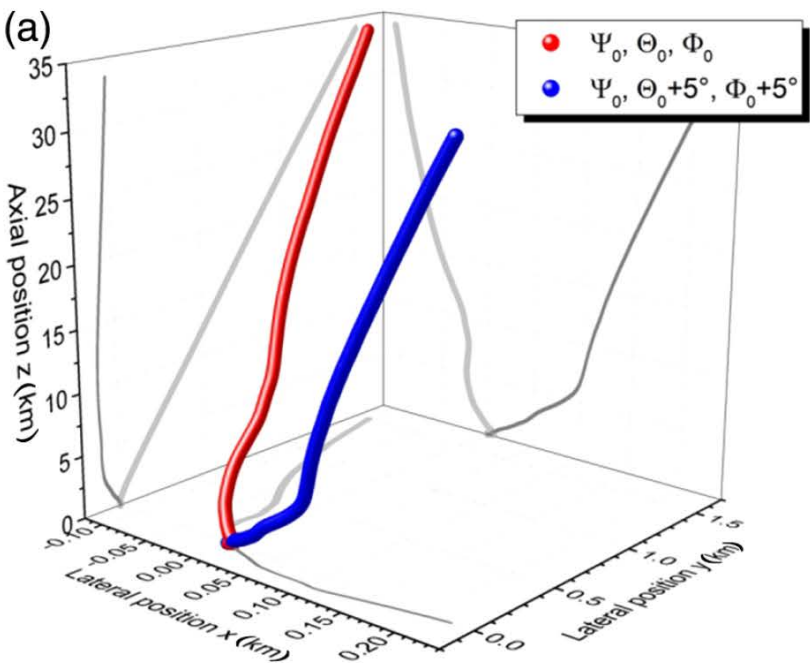
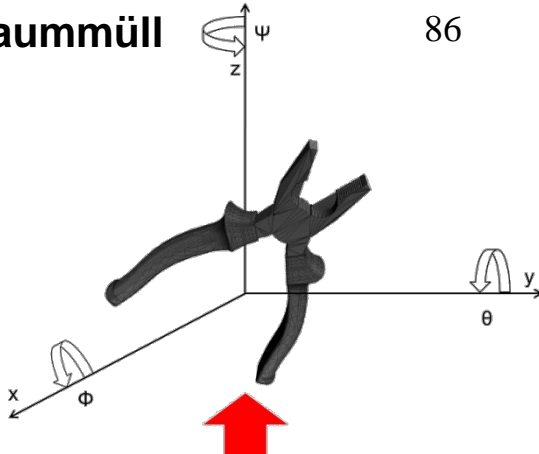


- Spotgröße am Target: \varnothing 0,5 m
- Laserpuls $E_L \leq 15 \text{ kJ} \rightarrow \Phi \geq 7,5 \text{ J/cm}^2$
- Rep.-rate $f_{rep} > 10 \text{ Hz} \rightarrow \bar{P} > 150 \text{ kW}$
- Wellenlänge: $\lambda = 1,0 \dots 1,1 \text{ }\mu\text{m}$

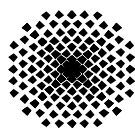


Impulserzeugung

- ▶ Richtung des Lateralimpulses nicht vorhersagbar
- ▶ starke Abhängigkeit von Orientierung im Raum
- ▶ Synchronisierung mit Lichtkurve sinnvoll



Stefan Scharring, Jascha Wilken, Hans-Albert Eckel, "Laser-based removal of irregularly shaped space debris," Opt. Eng. 56(1), 011007 (2017), doi: 10.1117/1.OE.56.1.011007 (open access)



Inhalt

1 Einleitung

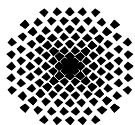
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

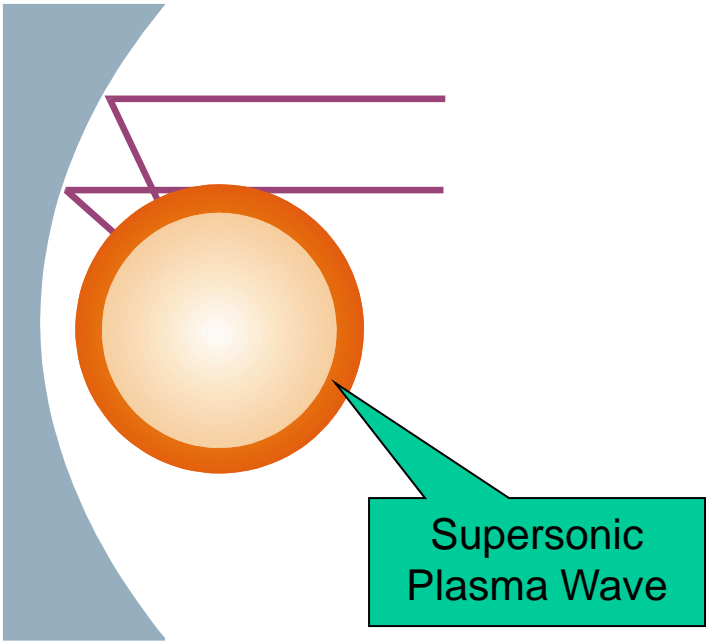
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > **3.3 Laser Lightcraft**
 - > 3.3.1 Detonationsprozesse
 - > 3.3.2 Lightcraft Technology Demonstrator
 - > 3.3.3 Parabolisches Lightcraft (DLR)
 - > 3.3.4 Russland - ASLPE
 - > 3.3.5 Earth-based LEO launch

4 Zusammenfassung

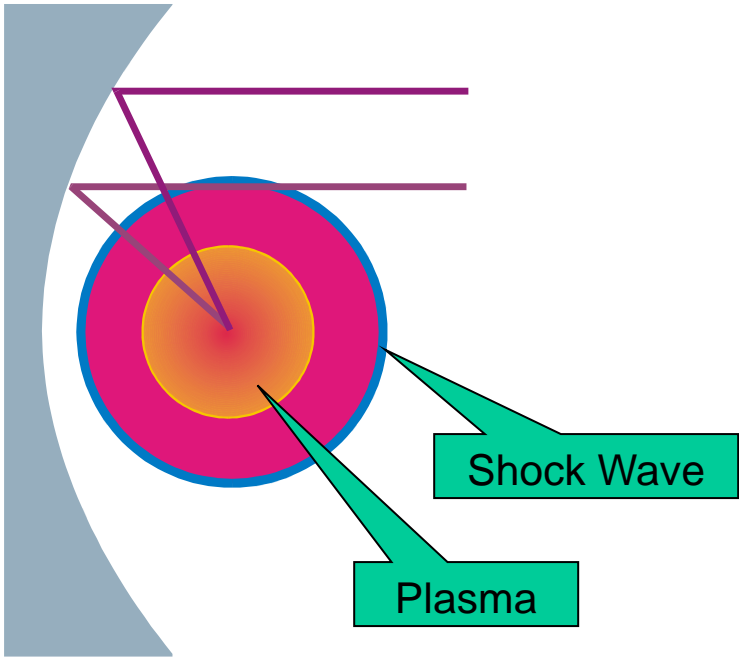


Lasergestützte Absorptionswellen



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \rightarrow \omega_{Laser}$$

Laser Supported Detonation Wave (LSD)
 $I > 10^7 \text{ W/cm}^2$



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \ll \omega_{Laser}$$

Laser Supported Combustion Wave (LSC)
 $I < 10^7 \text{ W/cm}^2$

Detonation ablativer Treibstoffe

Interne Effizienz für reine Ablation (s.o.):

$$\eta_{\text{int}} = \frac{1}{2} c_m \cdot v_{\text{jet}} = \alpha \beta$$

β Absorptionseffizienz
 α Expansionseffizienz

Interne Effizienz für exotherme Reaktionen:

$$\eta_{\text{int}} = \alpha(\beta + mQ/E_L)$$

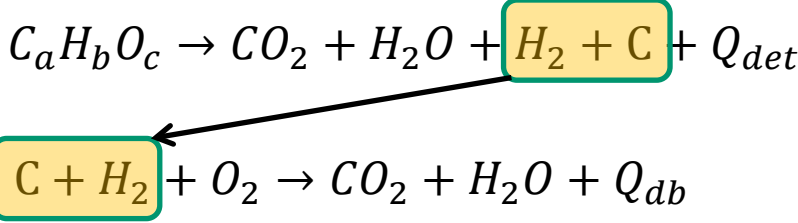
Q Spezifische Reaktionswärme
 E_L Laserpulsenergie

mit $Q = Q_{\text{det}} + N_{\text{db}} Q_{\text{db}}$

Q_{det} Spezifische Detonationsenergie

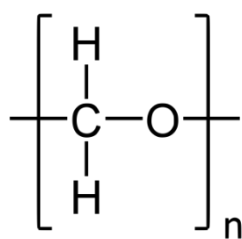
Q_{db} Spez. Energie für verzögerte Verbrennung

Beispiel: CHO-Polymere



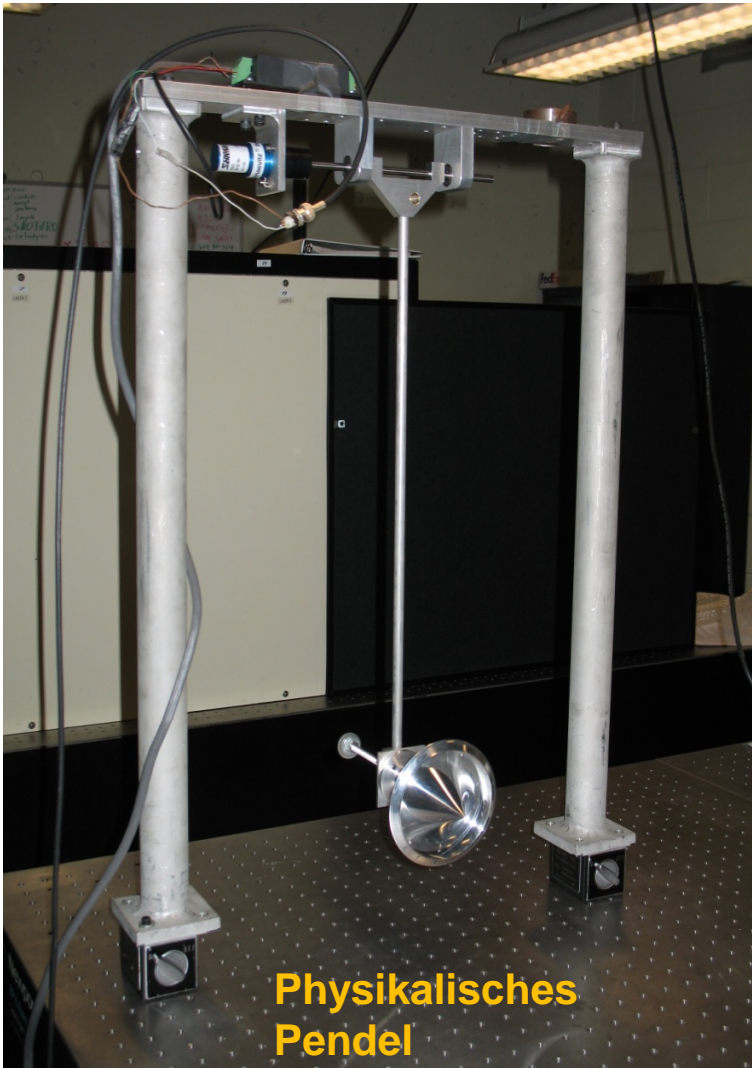
Bsp: Polyoxymethylen (Delrin, POM)

$Q_{\text{det}} = 2,69 \text{ J/mg}$
 $Q_{\text{db}} = 16,1 \text{ J/mg}$

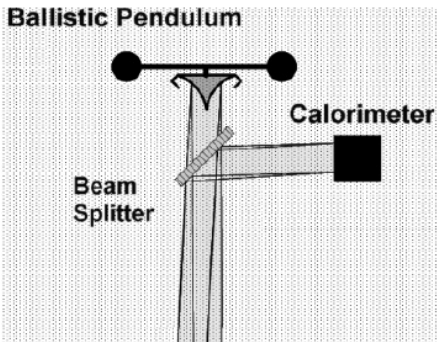
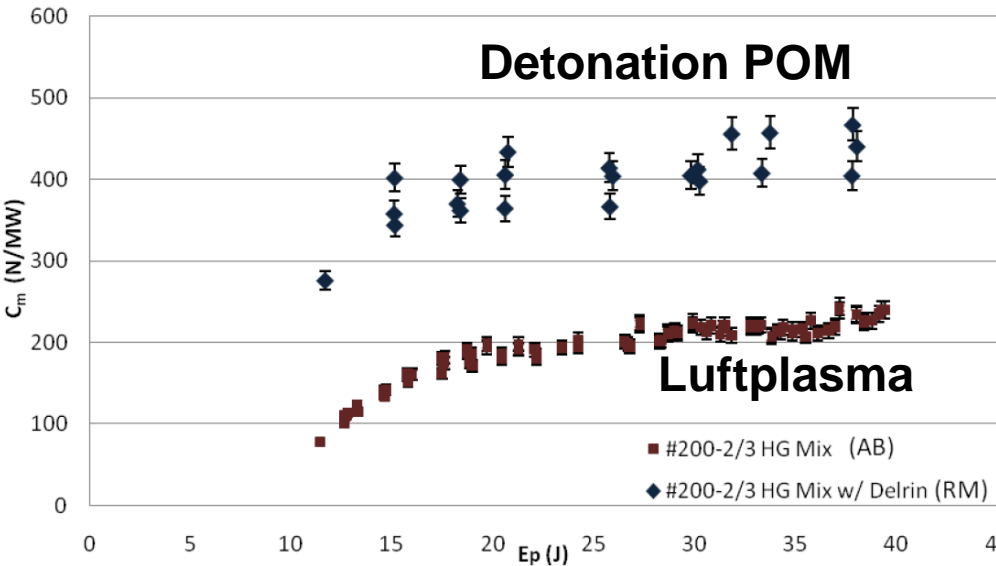


A.A. Ageichik et al, Detonation of CHO Working Substances in a Laser Jet Engine, Technical Physics **54(3)**, 402 – 409 (2009)

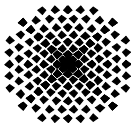
Pendelexperiment



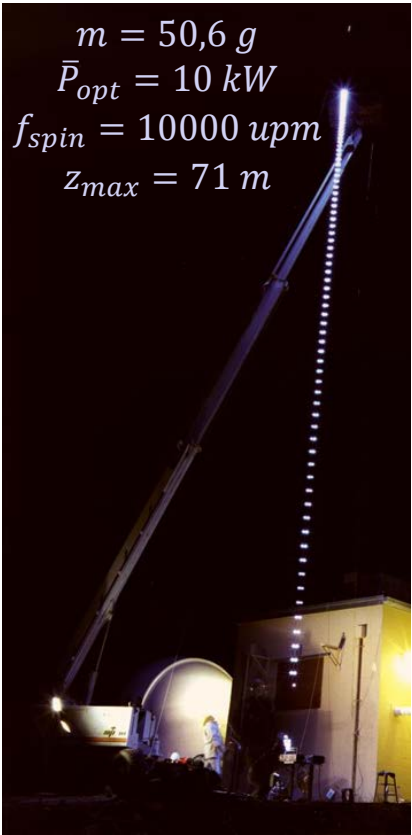
Physikalisches
Pendel



D.A. Kenoyer et al, Axial Impulse
Generation of Lightcraft Engines with
~ 1 μ s Pulsed TEA CO₂ Laser,
AIP Conf. Proc. **1402**, 82 – 92 (2011)

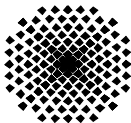


Weltrekordflug



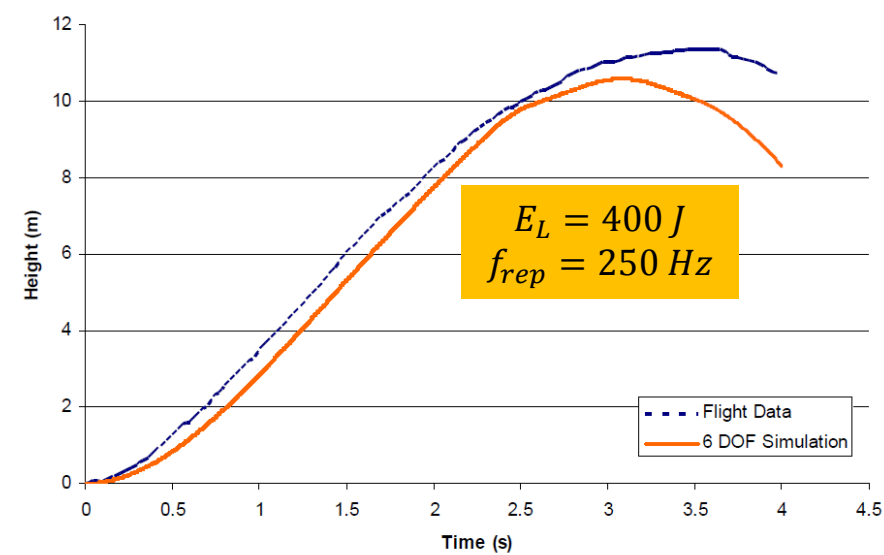
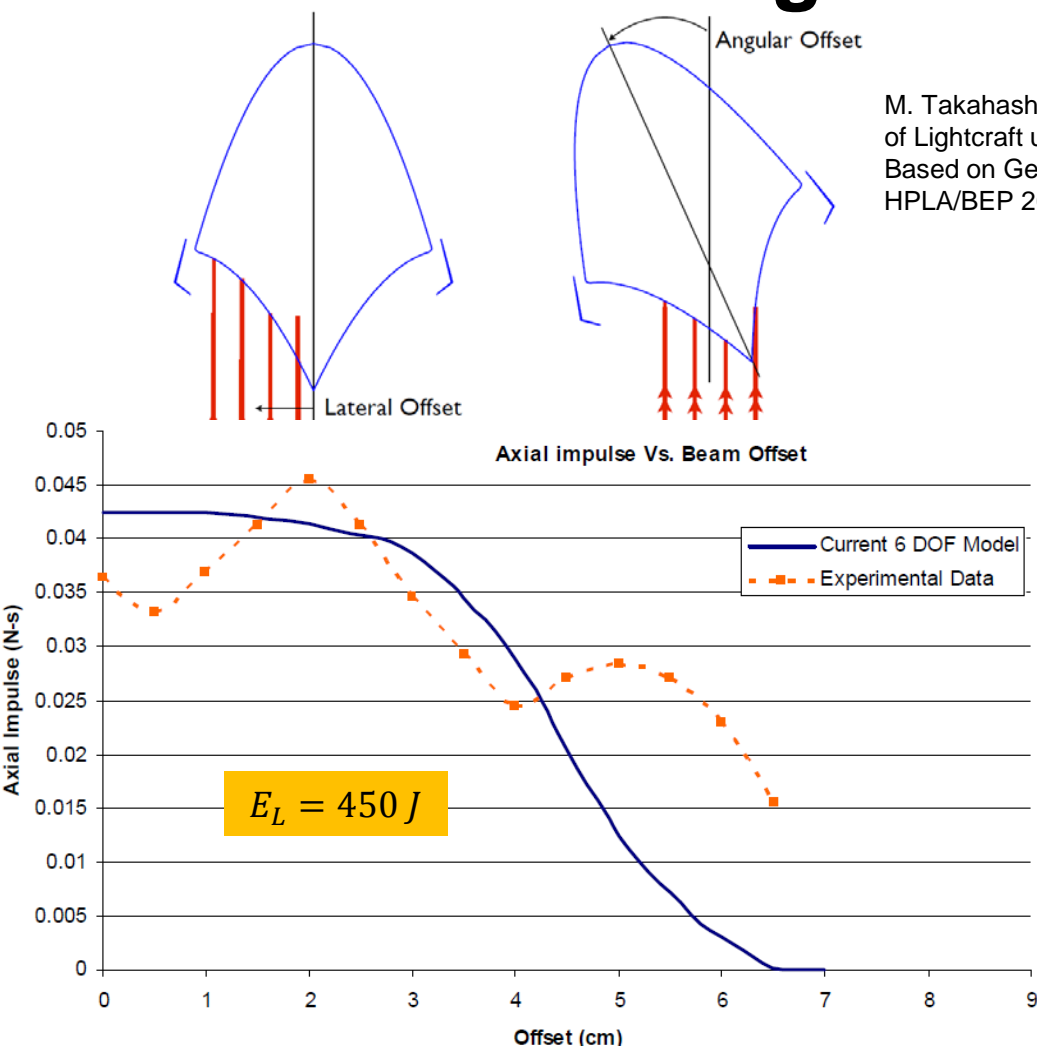
$$\begin{aligned} m &= 50,6 \text{ g} \\ \bar{P}_{opt} &= 10 \text{ kW} \\ f_{spin} &= 10000 \text{ upm} \\ z_{max} &= 71 \text{ m} \end{aligned}$$

L.N. Myrabo, World Record Flights of Beam-Riding Rocket Lightcraft: Demonstration of „Disruptive Propulsion Technology“, AIAA Paper 2001-3798



Flugbahnanalyse

M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014

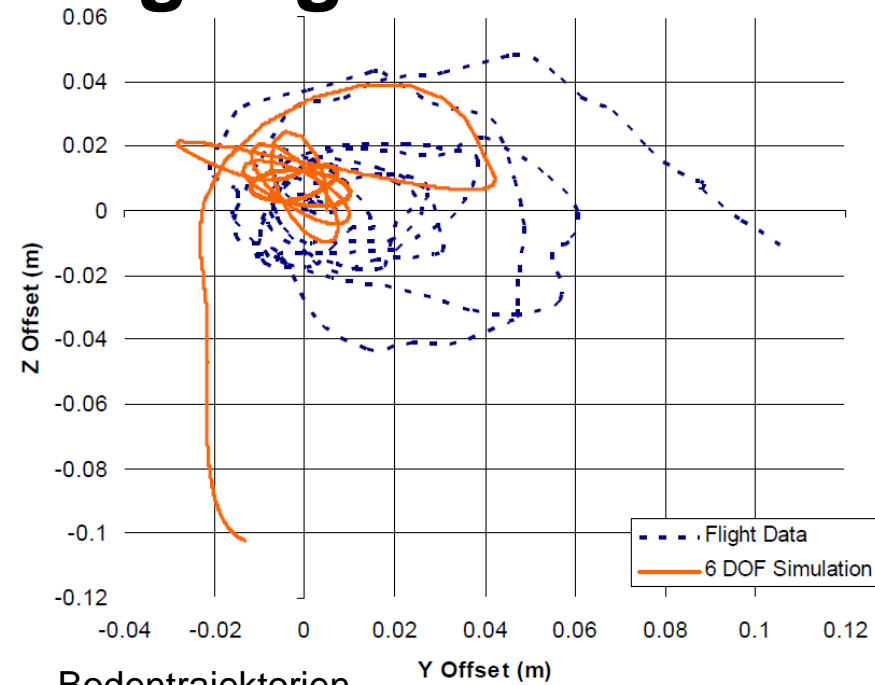
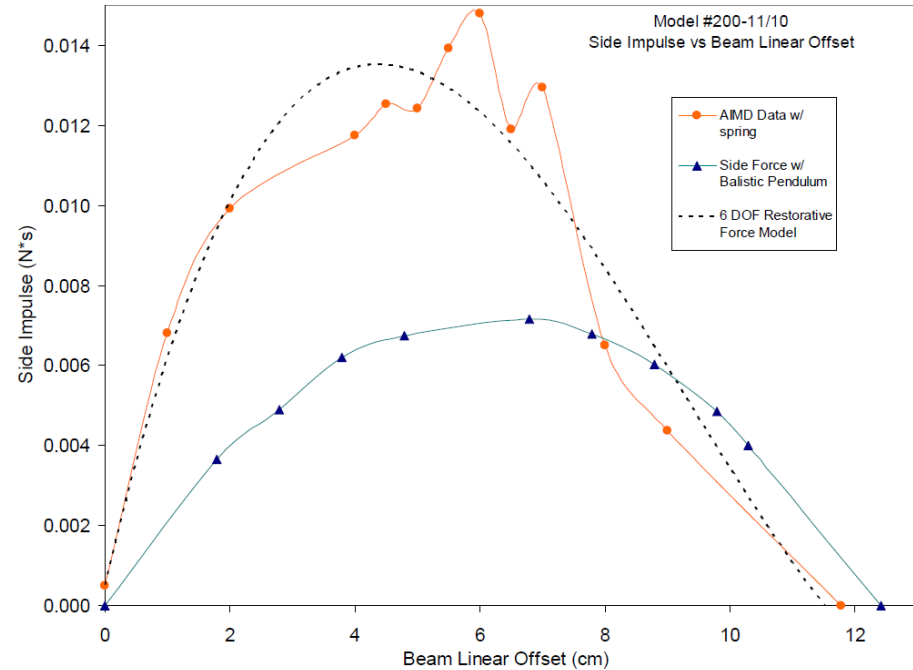


Simulationsrechnung mit aerodyn. Kräften

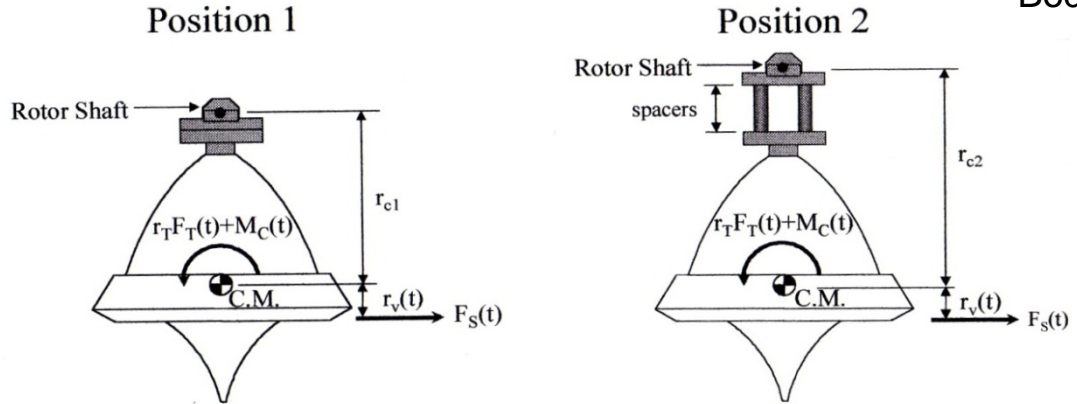
D.A. Kenoyer et al, Validation and Calibraton of a 6-DOF Laser Propelled Lightcraft Flight Dynamics Model vs. Experimental Data, AIP Conf. Proc. **997**, 325 – 337 (2008)

Pendelexperiment mit Lateralversatz

Lateralbewegung

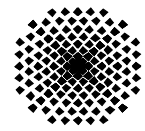


Bodentrajektorien D.A. Kenoyer et al, ebd.



Angular Impulse Measurement Device (AIMD):

- Drehimpuls auf Rotor bei verschiedenen Trägheitsmomenten
- Drehimpuls, Lateralimpuls auf Lightcraft

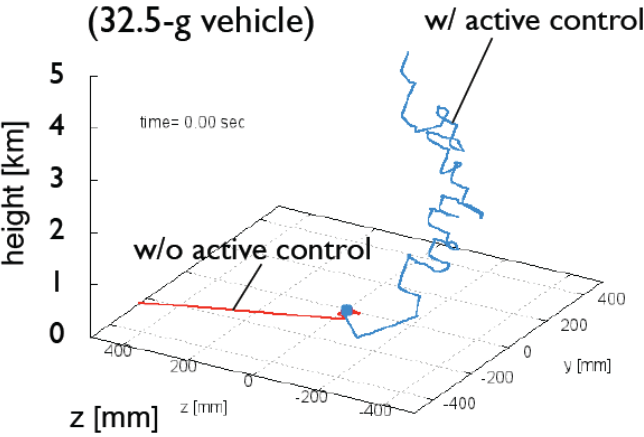
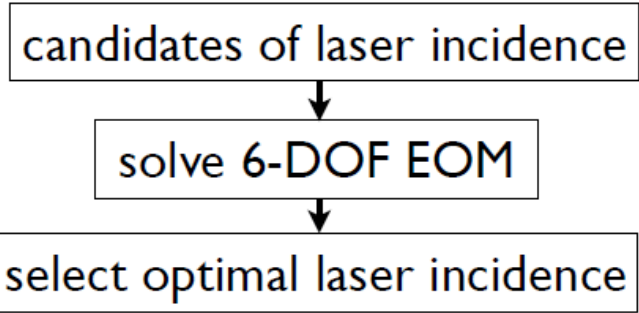
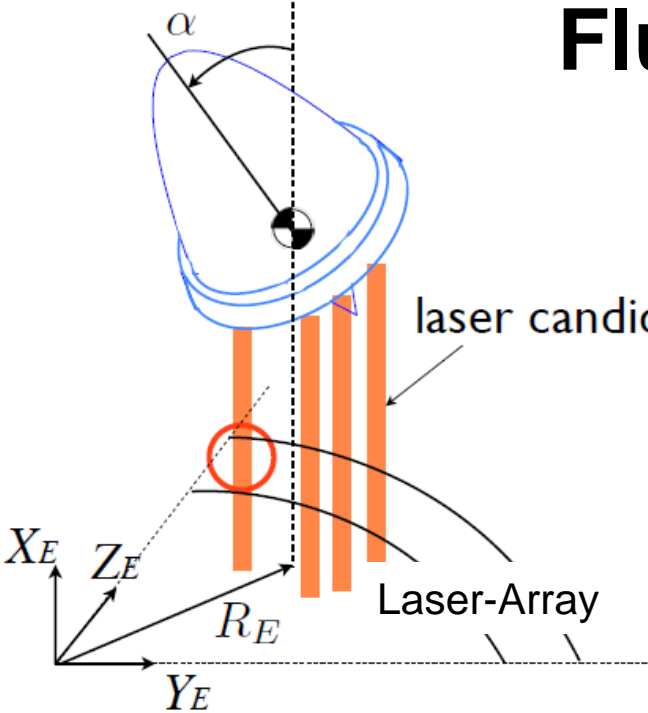


Universität
Stuttgart

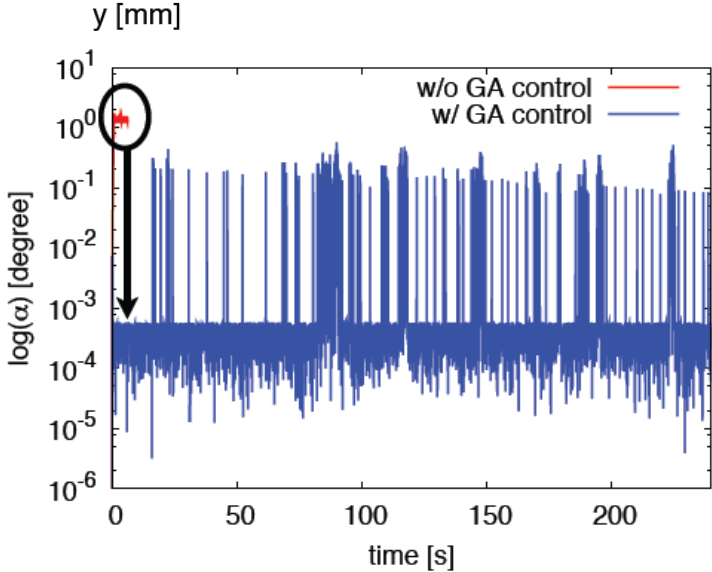
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



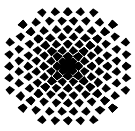
Flugstabilisierung



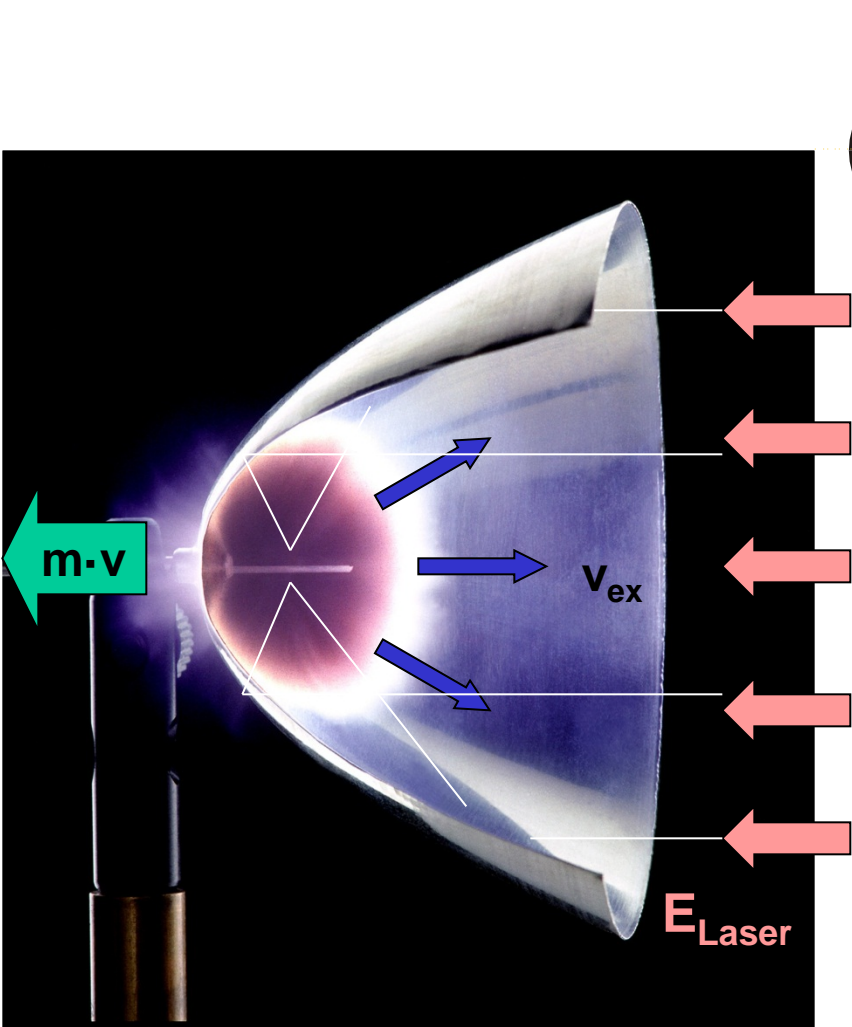
M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014



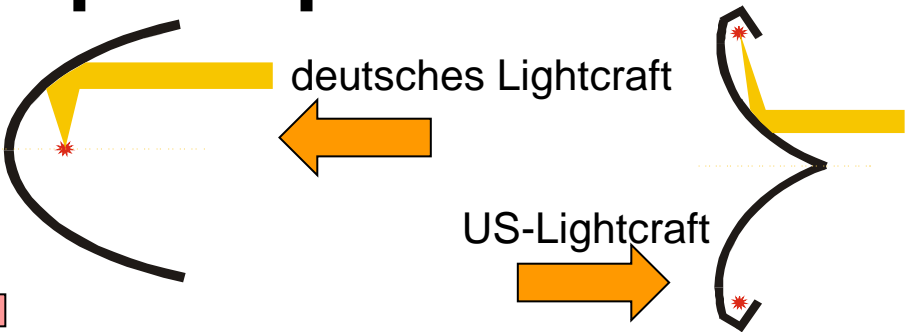
α : angular offset



Funktionsprinzip



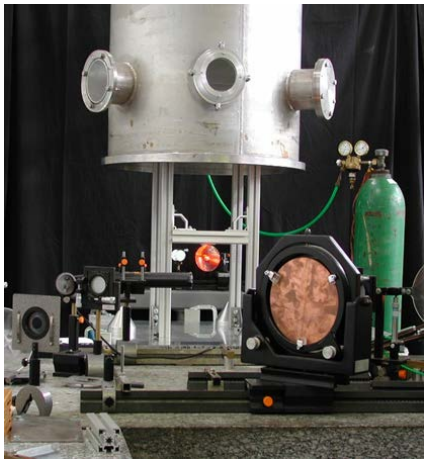
Air Plasma



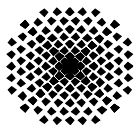
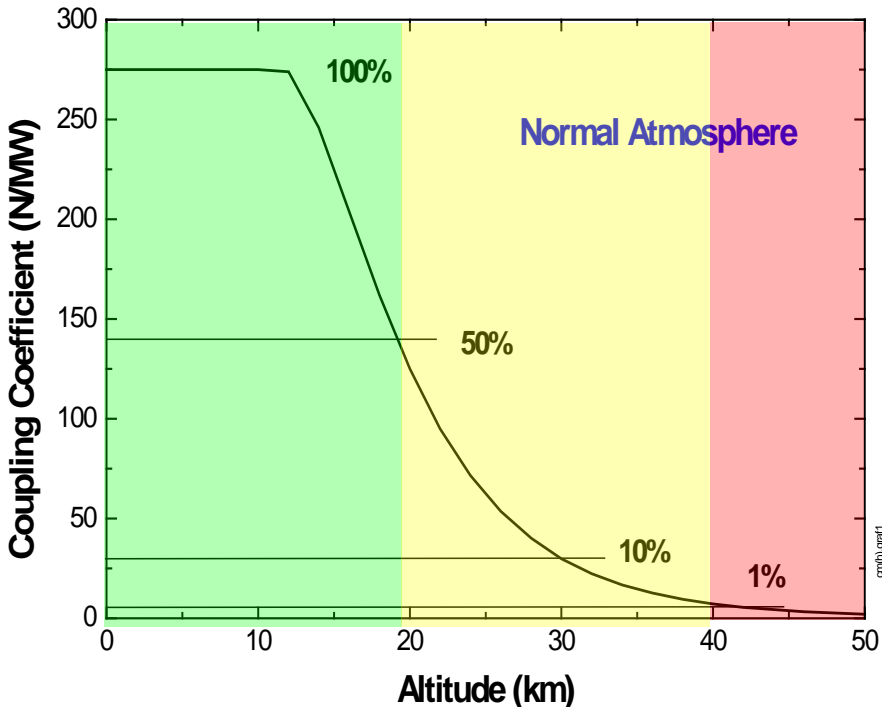
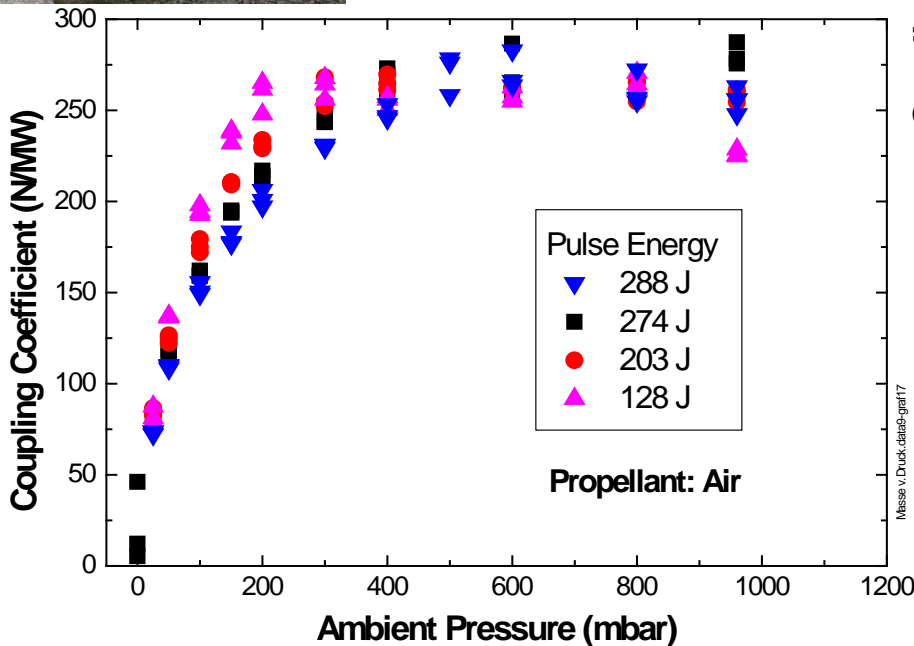
Laserpulsenergie $E_L = 20 \dots 200 \text{ J}$
Pulsdauer $\sim 8 \dots 12 \mu\text{s}$

- ⇒ Fokusintensität $> 10^7 \text{ W/cm}^2$
- ⇒ Plasmazündung
- ⇒ Schnell expandierendes Plasma
- ⇒ Impulsübertrag durch Druckanstieg und ausströmende Materie (Treibstoff/Luft)

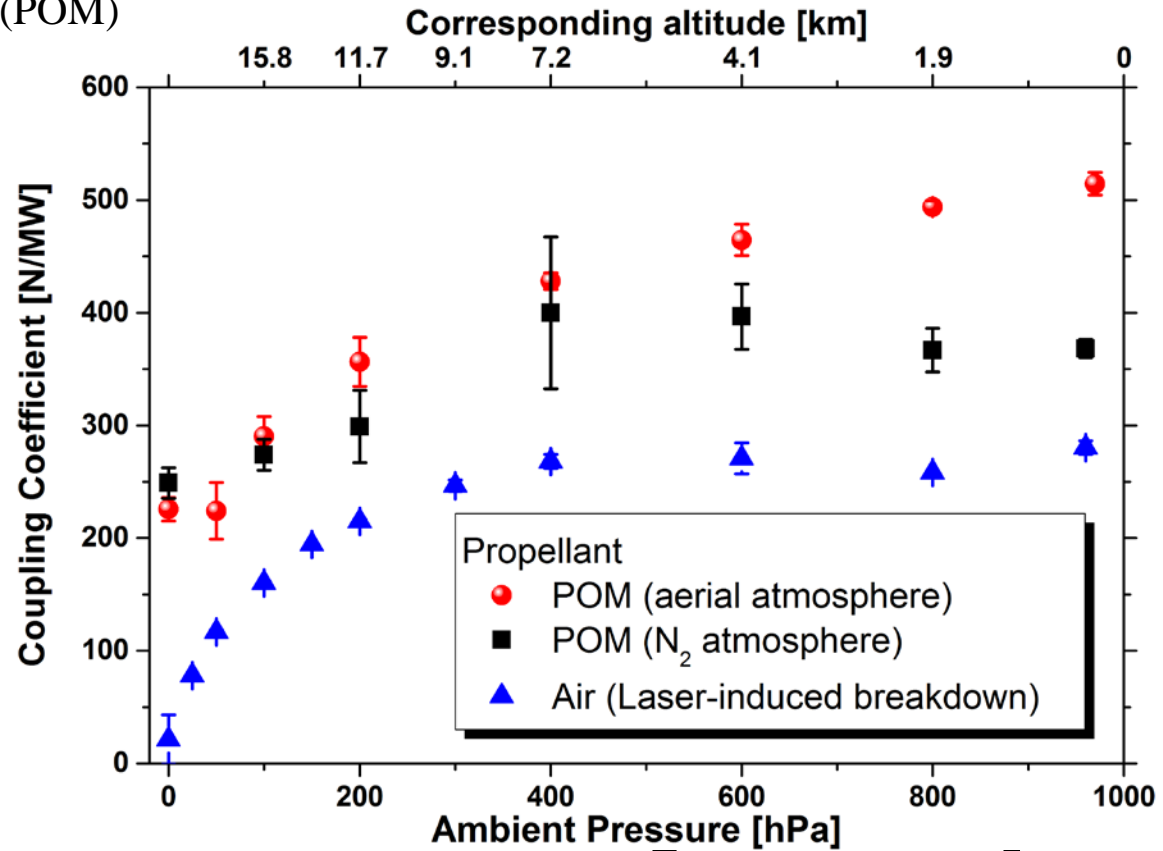
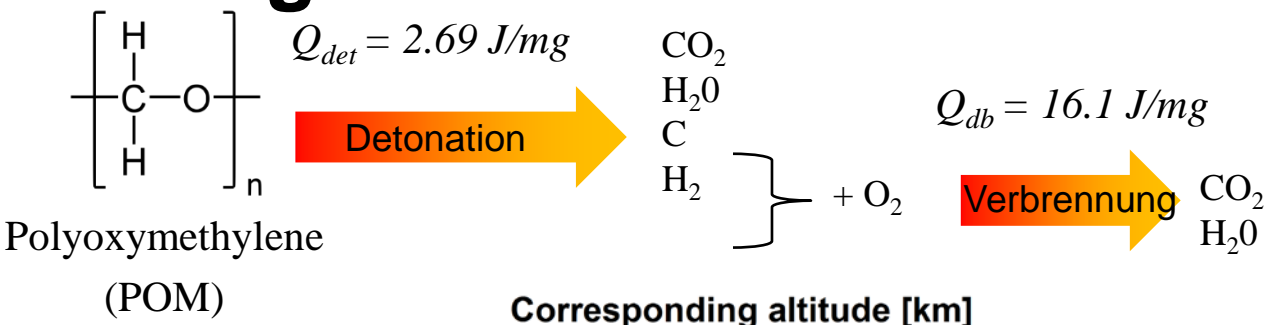
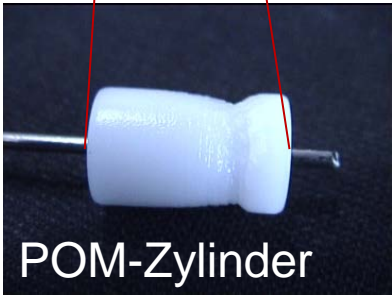
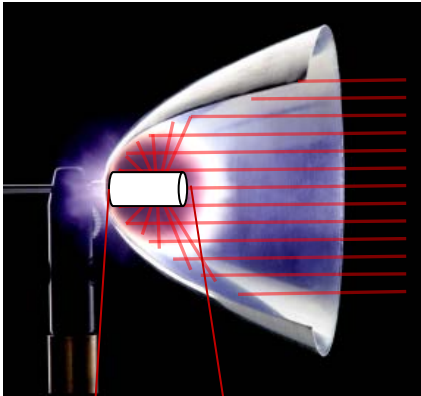
Höhensimulation – ohne Treibstoff



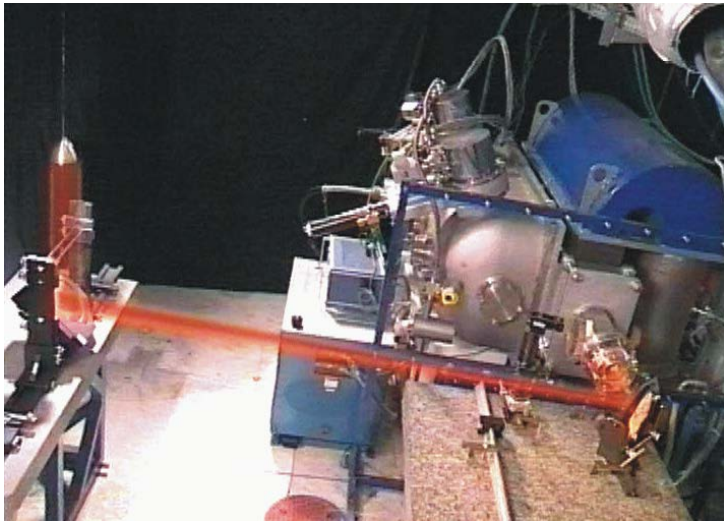
Ballistisches Pendel
im Vakuumtank



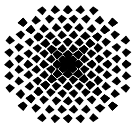
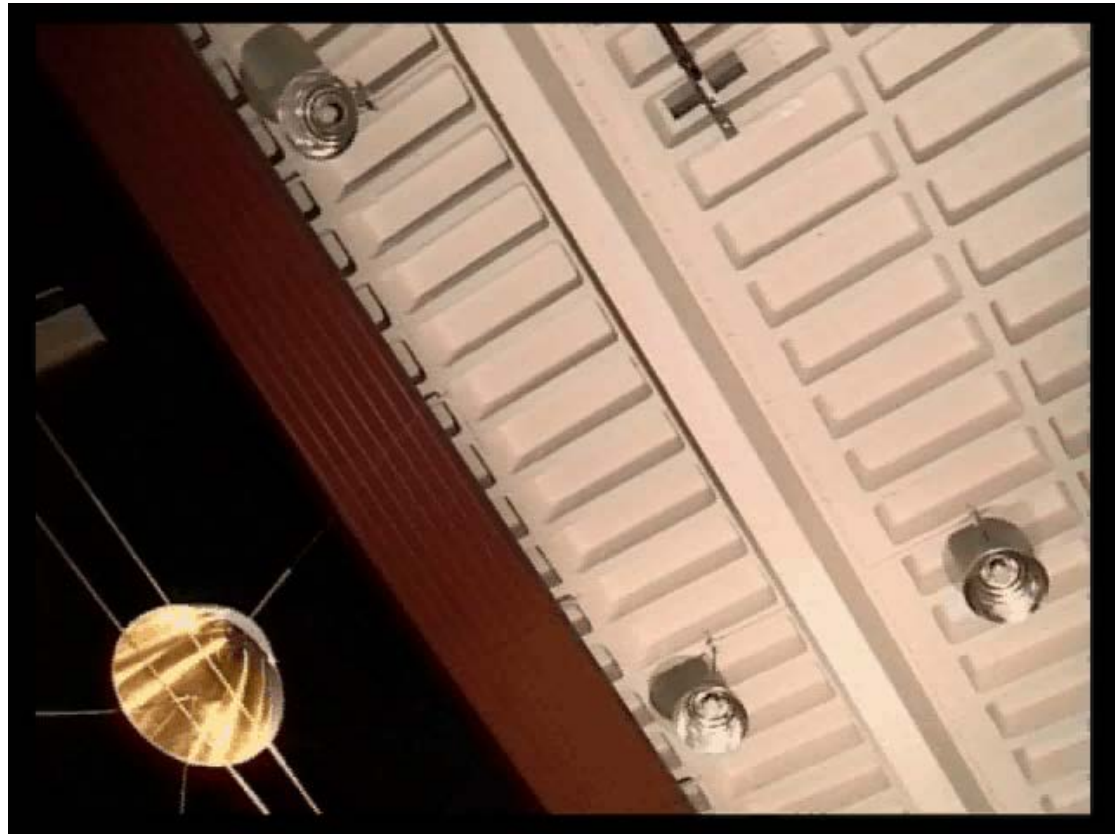
Verwendung von Treibstoff



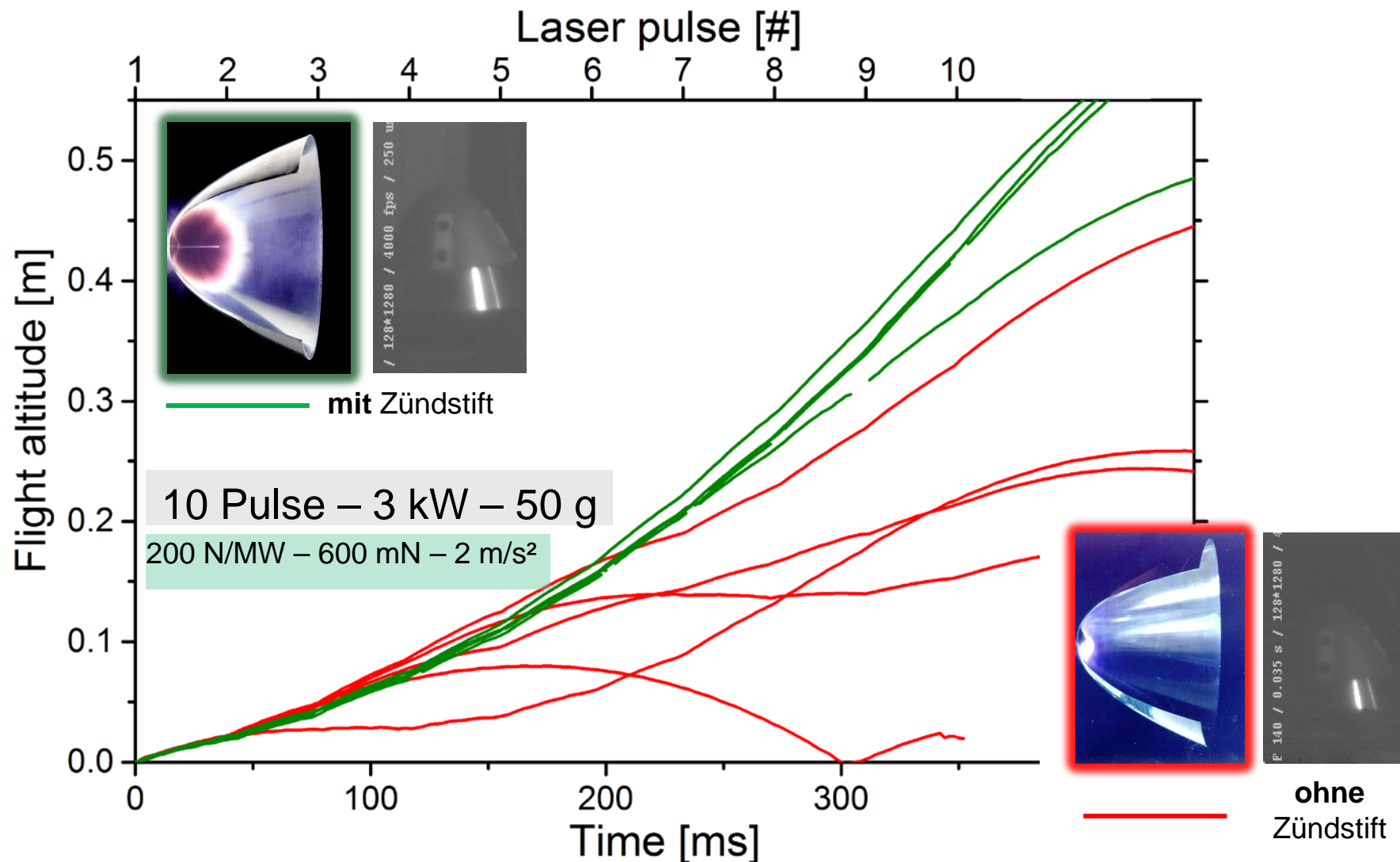
Drahtgeführte Flugexperimente



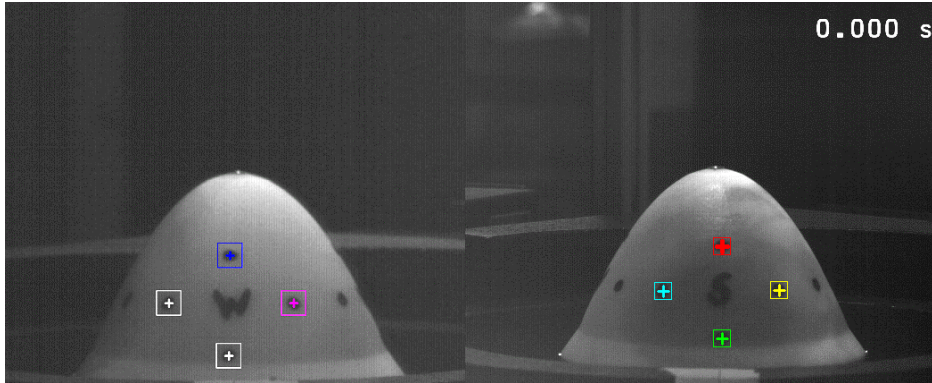
- Flughöhe 6 m
- 8 Pulse, 80 J, 15 Hz
- Beschleunigung $\sim 1g$
- $m = 22...55\text{ g}$
- Schub $T=1,05\text{ N}$
- Ohne Treibstoff
- drahtgeführt



Freiflugexperimente ohne Spin



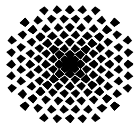
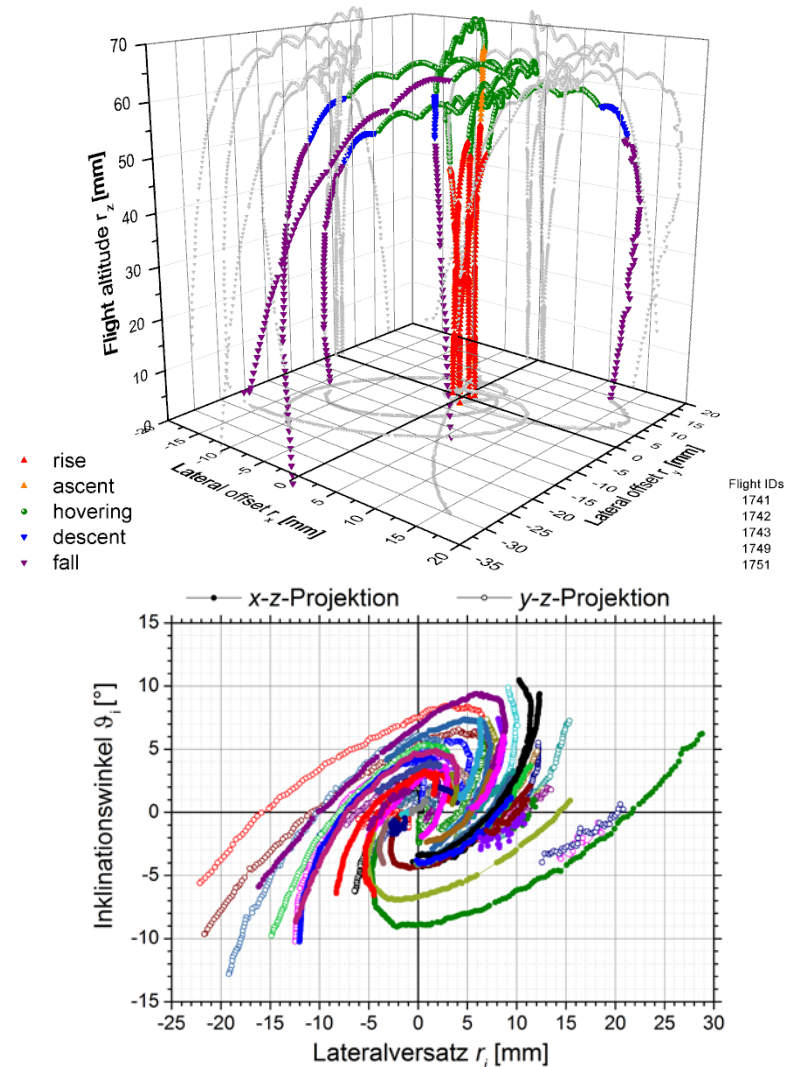
Trajektorienanalyse



- Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (500 Bilder/s) aus 2 Perspektiven (45°-Spiegel)
- Rekonstruktion von Trajektorie und räumlicher Orientierung
- Bestimmung der Impulskomponenten

S. Scharring et al, Beam-Riding Analysis of a Parabolic Laser-thermal Thruster, AIP Conf. Proc. **1402**, 115 – 131 (2011)

S. Scharring, Dissertation, Universität Stuttgart (2013)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Aerospace Laser Propulsion Engine

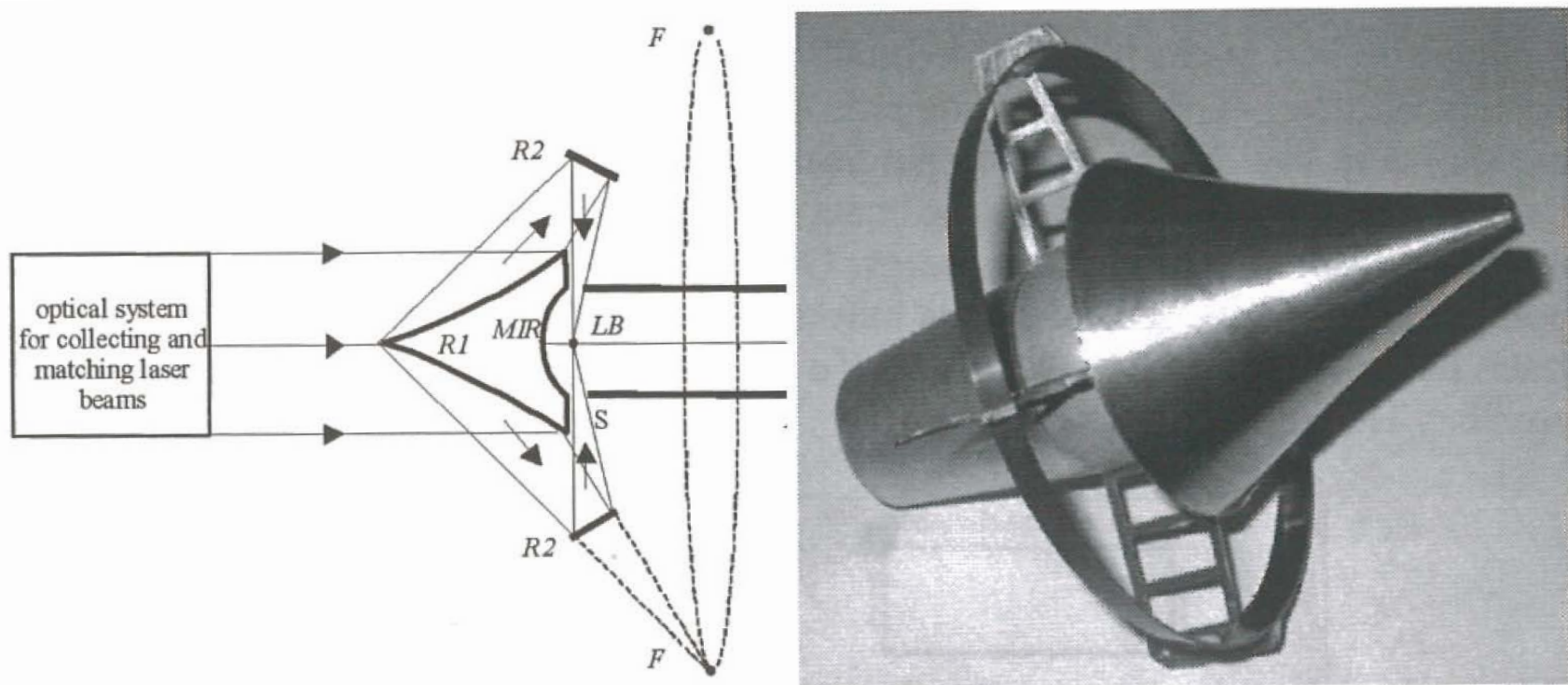
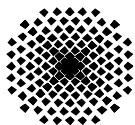


FIGURE 1. General Optical Scheme, Assembling, and a Photo of the ASLPE Model.

- Traktorstrahl
- gepulst & cw-Betrieb möglich
- CHO-Polymere als Treibstoffe

Yu. A. Rezunkov et al, Performance Characteristics of Laser Propulsion Engine
Operating both in CW and in Repetitively-Pulsed Modes, AIP Conf. Proc. **830**: 3 – 13 (2006)

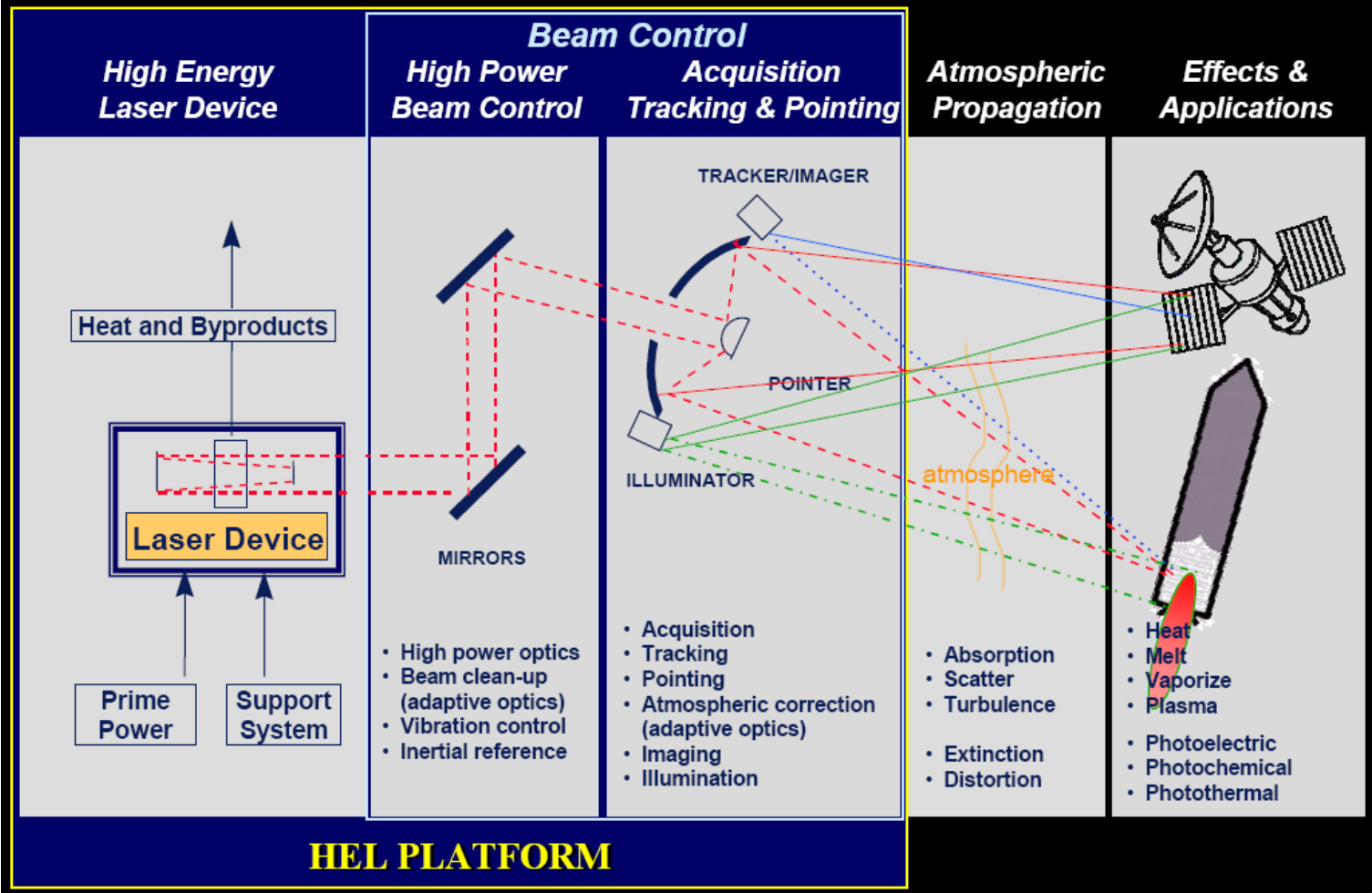


Universität
Stuttgart

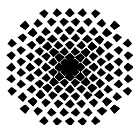
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de





Konzeptionelle Überlegungen



J.R. Cook, Atmospheric Applications of High Energy Lasers, Proc. Of XV International Symposium on GCL-HPL 2004 Prague



Energiebilanz


$$E_{kin} = 1/2 m v^2 = \eta_{prop} \psi^{-1} \alpha \beta \gamma \delta \cdot E_{wall}$$


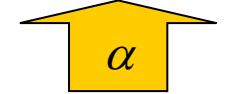
Antriebseffizienz



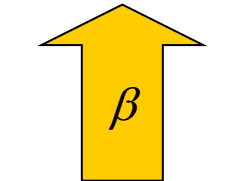
Mechanische Effizienz



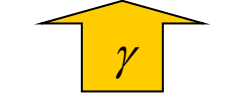
Expansionseffizienz



Absorptionseffizienz




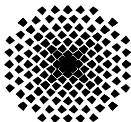
Transmissionseffizienz



Laserwirkungsgrad



- Kinetische Energie des Lightcrafts
- Energiekopplung zum Lightcraft
- Kinetische Energie des Treibstoffjets
- Innere Energie des Treibstoffes
ggf.:
Detonation
Verbrennung 
- Laserpulsenergie am Treibstoff
- Ursprüngliche Laserpulsenergie
- Elektrische Energie



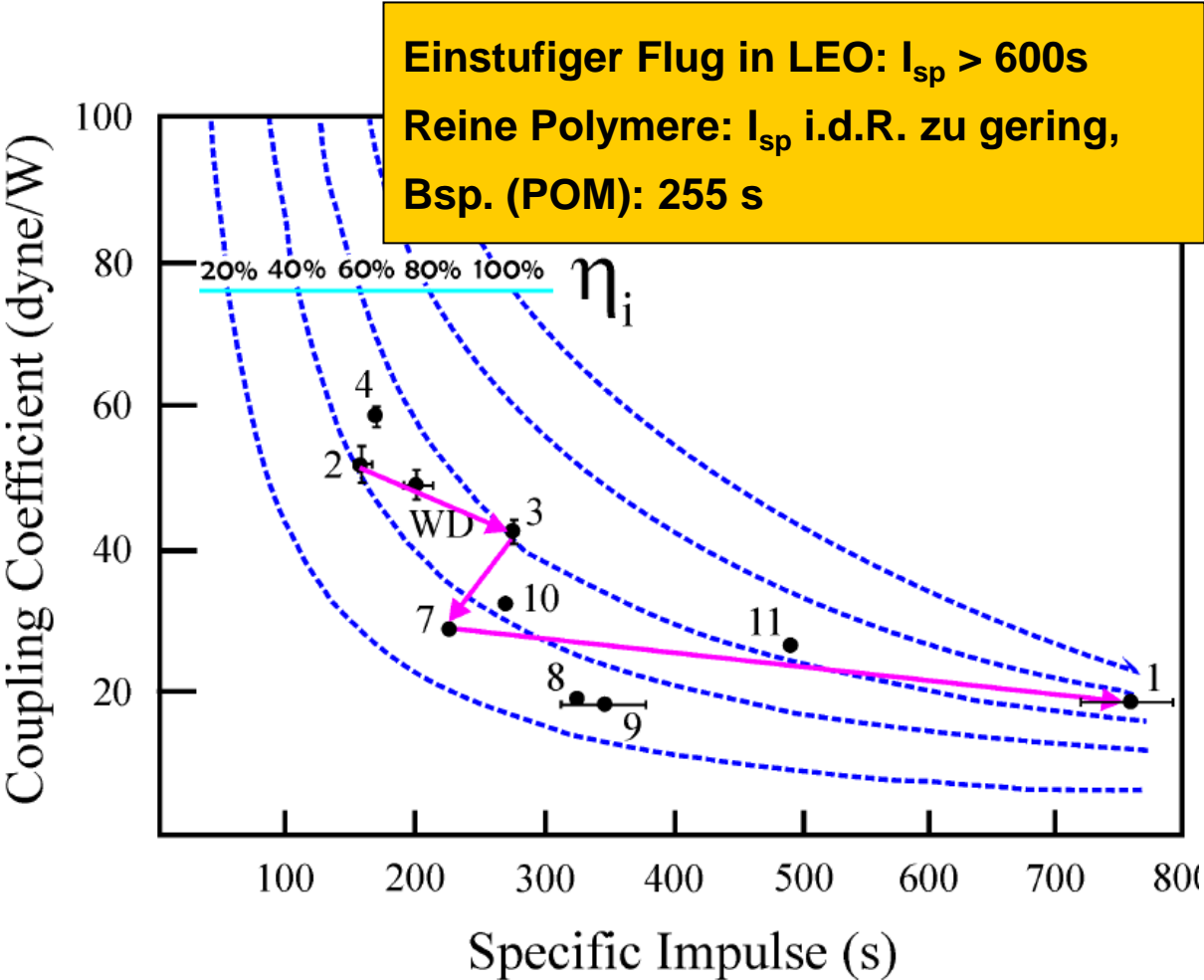
Constant momentum mission

Dynamische Anpassung:
 $V_{jet} = V_{rocket}$
anstelle von
 $V_{jet}=const.$

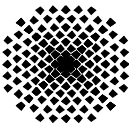
Hohes c_m : 485 N/MW
Ammoniumperchlorid (AP)

Hoher I_{sp} : 754 s
Teflon (PFTE)

Zeitliche Variation der
Treibstoffzusammensetzung

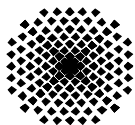


Larson, C.W., Mead, F.B, Knecht, S.D., Laser Propulsion and the Constant Momentum Mission, AIP Conf. Proc. **702**, 216 – 227 (2004)
Pakhomov, A.V., Mahaffy, K.E., Binary Solid Propellants for Constant Momentum Missions, AIP Conf. Proc. **997**, 266 – 279 (2008)



Systembetrachtungen

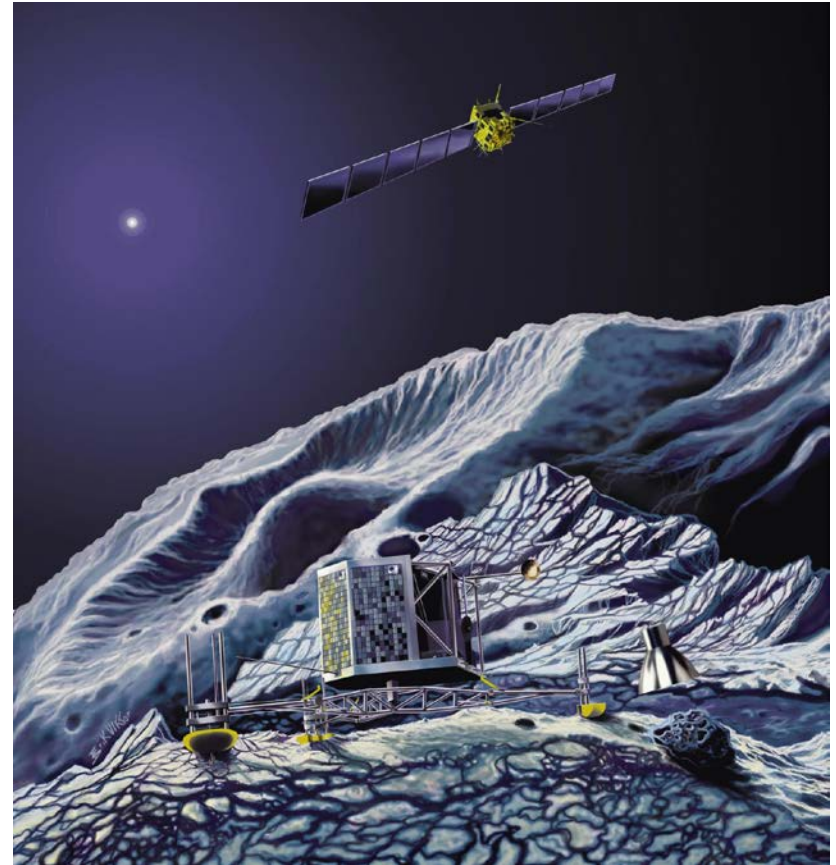
- Teleskop mit einer Reichweite bis zu 1000 km
- adaptive Optik erforderlich
- Mittlere optische Laserleistung:
0,2 ... 1 MW / kg Nutzlast
 - hohe Anfangsinvestition
- Externe Energiequelle:
 - günstiges Masse/Nutzlast-Verhältnis
 - Einfache Antriebstechnologie
 - geringe Startkosten
 - hohe Startfolge



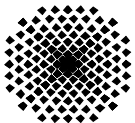
Weltraumgestützte Alternativen



Logistische Missionen



Probenrücksendung



Inhalt

1 Einleitung

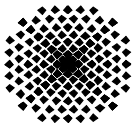
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

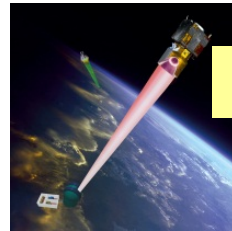
4 Zusammenfassung



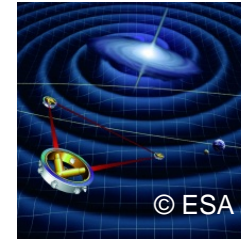
Skalierung und Anwendungsgebiete



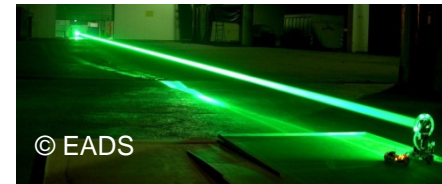
Photonenantrieb



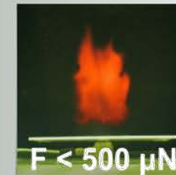
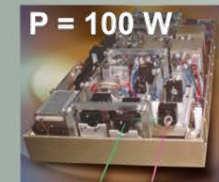
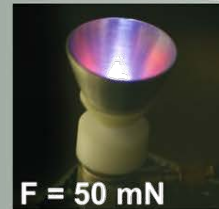
Lightcraft



- Mikroantriebe
- Debris removal
- Photovoltaik + Laser



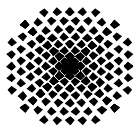
$$c_m = \frac{\text{thrust}}{\text{laser power}} =$$



Derzeitige Entwicklung

Mittelfristige Anwendung

Langfristige Vision



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Unkonventionelle Antriebe & Ideen

Das Brechen von Regeln ist der erste Schritt zur Innovation.

Wie wird aus einer Raupe ein Schmetterling? - Erste Aufgabe: Treten Sie nicht drauf.

Üben Sie die Erste Hilfe der Ideenrettung: Don't criticize, improve.

„Geht nicht!“ heißt oft, dass die Idee nicht verstanden wurde.

Das Bekannte zu verlassen, braucht immer außergewöhnliche Kraft.

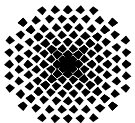
Vor jedem Erfolg steht nicht nur die Bereitschaft zu scheitern, sondern tatsächlich das Scheitern.

Alte Ideen stehen neue Ideen immer im Weg. Das Normale ist der Kampf neuer Ideen gegen alte Ex-Ideen.

Jeder Mensch hat zu jedem Begriff ein Vorurteil.

Wer berechnet, was es kostet, nichts zu riskieren?

Martin Gaedt, Rock your idea, Murmann Verlag (2016)



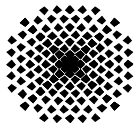
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Abbildungsnachweis

- DLR – Institut für Technische Physik: Seite 15, 27, 29, 31, 33, 43, 45, 47, 49, 52, 58, 59, 75 – 80, 83, 85, 86, 95 – 100, 105, 107, 108
- Seite 26:
 - Quander Metall- und Lasertechnik, <http://www.quander.de/lasertechnik/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Entertainment Weekly, <http://www.telegraph.co.uk/film/star-wars-the-force-awakens/facts-characters-best-scenes/> zuletzt aufgerufen: 12.01.2016
 - EPA (Handout), in Die Presse.com, Aufblasbarer Weltraumaufzug soll 200 Kilometer hoch werden, 19.06.2009 , <http://diepresse.com/home/science/488552/Aufblasbarer-Weltraumaufzug-bis-in-200-Kilometer-Hohe>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Ascending Technologies, in: online Focus, Mini-Hubschrauber - Verkehrsüberwachung per Fernsteuerung, 01.02.2012, http://www.focus.de/auto/news/mini-hubschrauber-verkehrsueberwachung-per-fernsteuerung_aid_709334.html, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Dr. med. Inken Lamcke, Femto- Lasik – PRK, 2013, <http://www.augenarzt-berlin.com/femto-lasik-prk/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Nations Wiki, Death Star I, http://nations.wikia.com/wiki/Death_Star_I, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Bundeshandelsschule und Bundeshandelsschule Völkermarkt, Photonenantrieb, <http://www.hak-vk.at/index.php?id=2861>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 28:
 - The New York Times, Arthur R. Kantrowitz, Whose Wide-Ranging Research Had Many Applications, Is Dead at 95, 9.12. 2008, http://www.nytimes.com/2008/12/09/science/09kantrowitz.html?_r=0, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Apogee Books, Author Biographies – Leik Myrabo, http://www.apogeespacebooks.com/Author_Bios/leik_myrabo.html, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 32:
 - NASA – National Space Science Data Center, Sputnik 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=1957-001B>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - Smithsonian National Air and Space Museum,
 - Heise Foto, Erich Kapfenberger, DampfloK, <http://www.heise.de/foto/galerie/foto/DampfloK-cc8ca0aab40ec62ada6180479fac5c82/>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - Bahnbilder aus dem Rhein-Main-Gebiet, Kai Hesse, http://www.bahnbilder.net/bilder/03-10-07/IMG_6597.jpg, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 35:
 - Thomas Edwards, The history of the laser, 2011, http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2011.web.dir/Thomas_Edwards/History.html, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - APS Physics, Focus: Invention of the Maser and Laser, 2005, <http://physics.aps.org/story/v15/st4>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 36:
 - Deutscher Schaustellerbund in: Impulse, 22.11.2013, <http://www.impulse.de/leben/talfahrt-fur-wilde-karusselle-wie-sich-das-geschafft-der-schausteller-verandert>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
 - Best Greetings, e-Cards, Orkut Scraps, Glitter Graphics 4 All- Copy and Paste, <http://easyscraps.blogspot.de/2010/09/free-emoticons-for-orkut.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
 - SmilieCenter, Big smilies 0031, http://www.smiliecenter.de/0/big/big_smilies_0001.htm, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014



Abbildungsnachweis

- Seite 41: Wikipedia in http://www.klangspiel.ch/laser_pointer_red_774/, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 42: National Ignition Facility, <https://lasers.llnl.gov/media/photo-gallery>, zuletzt aufgerufen: 27.01.2017,
- RP Photonics Encyclopedia – YAG Lasers, http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 43: BATOP Optoelectronics, <http://www.batop.com/information/microchip-laser.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 49: FAS Space Policy Project – Airborne Laser, <http://www.fas.org/spp/starwars/program/abl.htm>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 52: vgl. Seite 4,
- Lisa Pathfinder Mission, EADS Astrium, <http://gallery.astrium.eads.net/app/photopro.sk/astrium/detail?docid=92>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 53: MIT, Archimedes Death Ray: Idea Feasibility Testing, October, 2005, http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10_ArchimedesResult.html, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 75: Edge-Wave IS-Series, <http://www.edge-wave.de/web/produkte/short-pulse-systeme/is-serie/>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 76: SFB 716, Laserablation in Metallen, <http://www.sfb716.uni-stuttgart.de/forschung/teilprojekte/projektbereich-b/b5/ergebnisse.html>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014

